



Gonçalo Estorninho Marques

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Estudo numérico do efeito no escoamento da
porosidade de uma rede à saída de um
divergente numa conduta de secção retangular**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Daniel Cardoso Vaz,
Professor Auxiliar, DEMI/FCT-UNL

Júri

Presidente: Doutor José Fernando de Almeida Dias, Professor Associado, FCT/UNL
Vogais: Doutora Diana Filipa da Conceição Vieira, Professora Auxiliar Convidada,
FCT/UNL
Doutor Daniel Cardoso Vaz, Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

julho, 2020

Estudo numérico do efeito no escoamento da porosidade de uma rede à saída de um divergente numa conduta de secção retangular

Copyright © Gonçalo Estorninho Marques, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Daniel Vaz por me ter orientado e acompanhado na elaboração desta dissertação. Pelo esclarecimento de dúvidas, sugestões, correções e pela disponibilidade que teve para comigo.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, por facultar os meios computacionais e o espaço de trabalho.

Quero agradecer à minha família e amigos que me acompanharam e apoiaram nesta etapa importante da minha vida, e pela preocupação e incentivo demonstrado. .

Finalmente quero agradecer aos meus pais e ao meu irmão por terem sempre acreditado em mim, o orgulho demonstrado, as palavras de motivação e por investirem na minha formação.

RESUMO

O Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada (LMFTA) possui um túnel aerodinâmico de grandes dimensões. Contudo devido ao seus elevados custos e cuidados necessários, não está disponível para o uso por parte dos estudantes de forma não supervisionada. Assim, pretende-se construir um túnel aerodinâmico de pequenas dimensões que possa ser utilizado em projetos e trabalhos laboratoriais. Esta dissertação vem dar seguimento ao projeto, iniciado anteriormente.

Para este estudo o objetivo principal foi perceber o efeito que a porosidade de uma rede à saída do divergente, que se pretende implementar no túnel em construção, tem no escoamento, recorrendo-se à ferramenta de CFD *ANSYS FLUENT*. Com a utilização de uma rede à saída de um divergente pretende-se que esta cause uma queda de pressão de maneira a evitar a separação da camada limite no divergente.

Começou-se por simular o domínio sem a rede e depois recorrendo às *User Defined Functions* (UDF) simulou-se o domínio para três redes. Através das UDF implementou-se a perda de carga para três coeficientes de queda de pressão diferentes (0,8, 1,5 e 3,0) bem como os fatores multiplicativos impostos à energia cinética turbulenta e à taxa de dissipação turbulenta, de forma a simular os efeitos na turbulência a jusante da rede. Ainda de forma a perceber os efeitos do divergente possuir uma variação do tipo de secção transversal, comparou-se com um caso em que essa variação não existiu.

Os resultados permitem concluir que a utilização das redes neste caso tem um efeito dissipador da zona de recirculação existente. Contudo não são capazes de a eliminar por completo. Em relação ao escoamento a jusante do divergente, os resultados demonstram que as redes com $K=0.8$ e $K=1.5$ tornam o escoamento mais torcido do que a rede com $K=3.0$, numa região mais próxima da rede. Relativamente ao caso de comparação, é demonstrado que a variação do tipo de secção transversal causa uma maior perturbação do escoamento.

Palavras-chave: Túnel aerodinâmico, divergente, rede, CFD, UDF, zona de recirculação

ABSTRACT

The Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica aplicada (LMFTA) has a large wind tunnel. However, due to its high cost and care required, it is not available for unsupervised use by students. Therefore the need of build a small wind tunnel that could be used in projects and laboratory work arose. This dissertation is a continuation of the project, initiated previously.

For this study the main goal was to understand the effect that the porosity of a screen at the exit of a diffuser, which is going to be implemented in the tunnel under construction, has on the flow using ANSYS FLUENT CFD tool. By using a screen at the outlet of a diffuser it is intended that it causes a pressure drop in order to avoid boundary layer separation in the diffuser.

The domain was first simulated without the screen and then using the User Defined Functions (UDF), three screens were simulated. The UDF implemented the pressure drop for three different pressure drop coefficients (0.8, 1.5 and 3.0) as well as the multiplicative factors imposed on the turbulent kinetic energy and the turbulent dissipation rate, in order to simulate the effects on the turbulence downstream of the screen. Also in order to understand better the effects of the diffuser in study having a variation in the type of cross-section, it was compared with a case in which this variation did not exist.

The results concluded that the use of the screen in this case has a dissipating effect of the existing recirculation zone. However, the drop coefficients were not able to eliminate it completely. The results of the flow downstream show that the screens with $K = 0.8$ and $K = 1.5$ make the flow more twisted than the screen with $K = 3.0$, in a region closer to the screen. The comparison case shown that the variation in cross-section type causes a greater flow perturbation.

Keywords: Wind tunnel, diffuser, screen, CFD, UDF, recirculation zone

ÍNDICE

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Glossário	xix
Siglas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da dissertação	2
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Túneis aerodinâmicos	5
2.2 Componentes do túnel aerodinâmico em desenvolvimento	6
2.2.1 Difusor	6
2.2.2 Rede e câmara de tranquilização	6
2.2.3 Convergente	7
2.2.4 Outro equipamentos e acessórios	7
2.3 Parâmetros do escoamento	8
2.3.1 Intensidade turbulenta	8
2.3.2 Coeficiente de pressão	8
2.4 Escoamento através de redes	9
2.4.1 Perturbação do escoamento a jusante da rede	9
2.4.2 Efeito da rede na uniformidade do escoamento	11
2.5 Escoamentos secundários	12
3 Modelos Numéricos	19
3.1 Equações RANS	19
3.2 Breve descrição dos modelos de turbulência	20
3.2.1 <i>k-ϵ Standard</i>	21
3.2.2 <i>k-ϵ Realizable</i>	22
3.2.3 RSM	22

3.3	Definição e discretização do domínio	23
3.3.1	CrITÉrios de qualidade de malha	23
3.3.2	Funções de parede	23
3.3.3	Condições de fronteira	24
3.3.4	User Defined Functions	26
3.3.5	DomÍnio	28
3.4	Definição de malhas	29
3.4.1	Malha	29
3.4.2	Seleção das condições de fronteira	30
3.5	Comparação com caso de um difusor com seccção de entrada quadrada	31
4	Resultados e Discussão	33
4.1	Estudo de independência de malha	33
4.2	Funções de parede	35
4.3	User Defined Functions (UDF)	36
4.3.1	Queda de pressão através da rede	36
4.3.2	Aplicação de fatores multiplicativos à energia cinética turbulenta e à taxa de dissipação turbulenta	37
4.4	Caso sem rede	37
4.4.1	Avaliação do parâmetro α	43
4.4.2	Vorticidade em relação ao eixo longitudinal	44
4.4.3	Uniformidade do escoamento no troço a jusante do divergente	45
4.4.4	Aumento do comprimento do troço a jusante	46
4.5	Casos com rede	47
4.5.1	Validação das UDFs	47
4.5.2	Aumento do comprimento do troço a jusante	52
4.6	Comparação com Caso de Secção Quadrada	59
5	Conclusão	63
5.1	Conclusões	63
5.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	64
	Bibliografia	66
A	User Defined Functions	69
A.1	Queda de Pressão	69
A.2	Fatores Multiplicativos impostos à energia cinética turbulenta e à taxa de dissipação turbulenta	72
B	Resultados para os casos com rede para os modelos $k - \epsilon$	75
B.1	Evolução de V_x para o modelo $k - \epsilon$ <i>Standard</i>	76
B.2	Evolução de V_x para o modelo $k - \epsilon$ <i>Realizable</i>	78

LISTA DE FIGURAS

2.1	Exemplo do efeito de uma rede supercrítica na intensidade turbulenta do escoamento (largura da malha $M=0,52$ cm, $\sigma=0,35$ e $Re_d \approx 330$). Fonte: Groth e Johansson, 1988.	11
2.2	Disposição da grelha e sistema de coordenadas. Fonte: Owen e Zienkiewicz, 1957	11
2.3	Coordenadas de um escoamento numa conduta quadrada. Fonte: Brundrett e Baines, 1964	14
2.4	Isolinhas da velocidade axial para um escoamento numa conduta quadrada. Fonte: Leutheusser, 1963	14
2.5	(a)Linhas de energia cinética turbulenta constante e (b) escoamento secundário numa conduta quadrada. Fonte: Brundrett e Baines, 1964.	15
2.6	Linhas de vorticidade constante Ω (adimensional). Fonte: Hoagland, 1960	15
2.7	(a)Contornos da velocidade axial média e (b) escoamentos secundários medidos por Nikuradse (1926) na sua dissertação. Fonte: White, 2011.	16
2.8	(a)Velocidade axial e (b) circulações do escoamento secundário. Fonte:Hurst e Rapley, 1989.	17
2.9	Energia cinética turbulenta (k/u^2) ao longo da bisettriz média da parede. Fonte:Hurst e Rapley, 1989.	17
3.1	Geometria do domínio	28
3.2	Vista isométrica Malha do domínio em estudo.	29
3.3	Malha da secção de saída do domínio em estudo.	30
3.4	Identificação das fronteiras do domínio nas simulações numéricas	30
3.5	Vistas (a) principal do difusor em estudo; (b) em planta do difusor em estudo; (c) em planta do difusor para comparação.	32
4.1	Contorno y^* nas paredes do domínio.	36
4.2	Evolução da velocidade longitudinal para os modelos (a) $k-\epsilon$ <i>Standard</i> ; (b) $k-\epsilon$ <i>Realizable</i> ; (c) RSM (continua).	38
4.2	Evolução da velocidade longitudinal para os modelos (a) $k-\epsilon$ <i>Standard</i> ; (b) $k-\epsilon$ <i>Realizable</i> ; (c) RSM (continuação).	39

4.3	Evolução (a) da velocidade longitudinal média na área não ocupada pela bolha de recirculação adimensionalizada pela velocidade teórica e (b) área da secção ocupada pela bolha de recirculação ao longo do domínio.	41
4.4	Velocidade longitudinal adimensionalizada pela velocidade teórica ao longo do domínio, apenas para a área disponível.	41
4.5	Evolução da pressão estática ao longo do domínio	42
4.6	Linhas de corrente ao longo de secções do domínio.	42
4.7	Contorno do parâmetro α para uma conduta de secção constante.	43
4.8	Contorno do parâmetro α para planos ao longo do domínio de estudo.	44
4.9	Contorno do parâmetro α na secção de saída domínio.	44
4.10	Campo de Vorticidade e linhas de corrente na secção de saída (a) da conduta longa de secção constante e (b) do caso de estudo.	45
4.11	Contorno da velocidade longitudinal na secção de saída(a) da conduta longa e (b) do caso de estudo	45
4.12	(a) Evolução da pressão estática ao longo do domínio aumentado e (b) pormenor da evolução da pressão estática nas regiões próximas da saída.	46
4.13	Comparação da evolução da área da bolha entre o caso de estudo — e o caso do domínio aumentado —.	47
4.14	Evoluções (a) da pressão estática e (b) da energia cinética turbulenta ao longo do domínio.	48
4.15	Evolução da velocidade longitudinal para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continua).	49
4.15	Evolução da velocidade longitudinal para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continuação).	50
4.16	Linhas de corrente ao longo de secções do domínio para os casos (a) $K=0.8$, (b) $K= 1.5$ e (c) $K=3.0$ (continua).	51
4.16	Linhas de corrente ao longo de secções do domínio para os casos (a) $K=0.8$, (b) $K= 1.5$ e (c) $K=3.0$ (continuação).	52
4.17	Linhas de corrente ao longo de secções do domínio aumentado para os casos(a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continua).	52
4.17	Linhas de corrente ao longo de secções do domínio aumentado para os casos(a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continuação).	53
4.18	Evolução da área da bolha de recirculação para a rede com $K=0.8$	54
4.19	Evolução da área da bolha de recirculação para as três redes.	54
4.20	Evolução da pressão estática para os casos com rede.	55
4.21	Evolução do parâmetro α ao longo de secções do domínio aumentado para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continua).	56
4.21	Evolução do parâmetro α ao longo de secções do domínio aumentado para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continuação).	57

4.22	Evolução do parâmetro α ao longo de secções do divergente para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$	58
4.23	Contorno de V_x na secção de saída para os casos (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$	59
4.24	Evolução da velocidade longitudinal para o caso em que a secção de entrada do divergente é quadrada.	60
4.25	Evolução do parâmetro α ao longo do domínio para o caso em que a secção de entrada do divergente é quadrada.	60
4.26	Parâmetro α na secção de saída do domínio.	61
4.27	Vorticidade na secção de saída do domínio	61
4.28	Contorno de V_x na secção de saída do domínio do caso de comparação.	62
A.1	UDF da queda de pressão da rede com $K=0.8$	70
A.2	UDF da queda de pressão da rede com $K=1.5$	71
A.3	UDF da queda de pressão da rede com $K=3.0$	72
A.4	UDF dos fatores multiplicativos impostos à energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta.	73
B.1	Evolução da velocidade longitudinal para o modelo $k-\epsilon$ <i>Standard</i> onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$ (continua).	76
B.1	Evolução da velocidade longitudinal para o modelo $k-\epsilon$ <i>Standard</i> onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$ (continuação).	77
B.2	Evolução da velocidade longitudinal para o modelo $k-\epsilon$ <i>Realizable</i> onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$ (continua).	78
B.2	Evolução da velocidade longitudinal para o modelo $k-\epsilon$ <i>Realizable</i> onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$ (continuação).	79

LISTA DE TABELAS

2.1	Características da grelha e das redes. Valores do número de Reynolds e coeficientes de queda de pressão para uma velocidade média de 5 m/s. Fonte: Groth e Johansson, 1988	10
3.1	Tipologia das condições de fronteira para o domínio em estudo	31
4.1	Descrição das Malhas do domínio utilizado nas simulações	33
4.2	Coefficiente de Pressão das diferentes malhas para o estudo de independência de malha	34
4.3	Critérios de qualidade das diferentes malhas	34
4.4	Resíduos das simulações numéricas das malhas utilizadas para o estudo de independência de malha	35

GLOSSÁRIO

ϵ	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (kg/(m.s)).
Ω	Vorticidade.
β	Porosidade.
μ	Viscosidade dinâmica (kg/(m.s)).
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s) .
ρ	massa volúmica (kg/m ³).
σ	Opacidade.
Δp	Diferença de pressão estática (Pa).
δ_{ij}	Kronecker.
\bar{u}	Velocidade média (m/s) .
C_p	Coeficiente de pressão.
D_h	Diâmetro hidráulico (m) .
g_i	Aceleração da gravidade (m/s ²).
2θ	Ângulo do difusor (°).
A	Área da secção transversal (m ²).
d	Diâmetro do fio da rede (m).
I	Intensidade turbulenta do escoamento (%) .
k	Energia cinética turbulenta (m ² /s ²).
K	Coeficiente de queda de pressão.
l	Escala de comprimento de turbulência (m) .
L	Comprimento do divergente (m) .
Le	Comprimento do troço a montante do divergente (m) .
M	Largura da rede (m).

GLOSSÁRIO

p	Pressão num ponto arbitrário do escoamento (Pa).
P	Perímetro da secção transversal (m).
p_{∞}	Pressão escoamento médio (Pa).
q_{∞}	Pressão dinâmica (Pa).
r	Relação de áreas de um difusor.
R_{ij}	Tensor de Reynolds (Pa).
Re_d	Número de Reynolds baseado no diâmetro do fio da rede.
Re_{Dh}	Número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico.
Re_{Le}	Número de Reynolds baseado no troço a montante do divergente.
U	Velocidade do escoamento (m/s) .
U_{∞}	Velocidade do escoamento livre (m/s) .
u'	Flutuações da velocidade (m/s).
V_x	Componente longitudinal da velocidade (m/s).
x	Distância na direção longitudinal (m).
y	Distância na vertical entre a parede e o centro da célula adjacente (m) .

SIGLAS

CFD *Computer Fluid Dynamics.*

LMFTA Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada.

RANS *Reynolds Averaged Navier Stokes.*

RSM Reynolds Stress Model.

UDF *User Defined Functions.*

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Os túneis aerodinâmicos são uma ferramenta essencial no estudo do escoamento de fluidos e teste de modelos. Eles permitem adquirir dados importantes sobre o escoamento em redor de objetos imersos, num ambiente controlado.

Uma faculdade de engenharia que pretenda oferecer aos seus alunos uma aprendizagem com rigor, deve oferecer-lhes ferramentas, onde possam complementar a sua aprendizagem com a experimentação. A juntar, há o facto da faculdade um núcleo de engenharia mecânica com o intuito de realização de projetos, sendo, assim, de grande importância a existência de túnel aerodinâmico que os alunos possam utilizar.

O Laboratório de Mecânica de Fluidos e Termodinâmica Aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial já possui um túnel aerodinâmico subsónico de grandes dimensões, contudo devido ao cuidado e custo que a sua operação requer, este não se encontra disponível para utilização, não supervisionada, dos estudantes. Houve, por isso, a necessidade da construção de um túnel aerodinâmico de pequenas dimensões e fácil operação que pudesse ser utilizado em trabalhos laboratoriais e projetos.

O principal objetivo no projeto de um túnel aerodinâmico é garantir um escoamento uniforme na secção de teste (Brusca, et al., 2011). A realização desta dissertação vem permitir o estudo de um dos componentes que garantem essa uniformidade do escoamento na secção de teste. A utilização de uma rede adequada na câmara de tranquilização garante que não haja separação do escoamento no divergente. Sendo, desta forma, mais um passo para que este túnel aerodinâmico de pequenas dimensões possa ser construído e utilizado.

A realização desta dissertação vem dar continuação a um trabalho realizado anteriormente (Pereira, 2016), onde foi estudado o convergente, outro componente de extrema

importância no respeito a garantir um escoamento uniforme na secção de teste.

1.2 Objetivos

O objetivo global desta dissertação é a estudar o efeito no escoamento da porosidade de uma rede situada à saída do divergente que se pretende instalar no túnel aerodinâmico a construir no LMFTA.

Para o domínio de simulação numérica a geometria adotada não será a do túnel aerodinâmico completa, uma vez que o convergente não será simulado. Esta dissertação pretende focar-se no escoamento no divergente.

Com o intuito de estudar o efeito da porosidade de uma rede no escoamento serão simuladas redes com porosidades diferentes. Diferentes porosidades terão diferentes quedas de pressão. Assim, recorrer-se-á a funções definidas pelo utilizador, as *User Defined Functions* (UDF), a fim de impor diferentes quedas de pressão, de acordo com os coeficientes de queda de pressão utilizados.

De modo a alcançar o objetivo global é necessário estabelecer os seguintes subobjetivos:

- Aprofundar conhecimentos sobre conceção e operação de túneis aerodinâmicos, incluindo o estudo do trabalho anteriormente realizado por Gonçalo Pereira;
- Familiarizar-se com: a ferramenta computacional *ANSYS FLUENT*, modelos de turbulência, a funcionalidade de *User Defined Functions* (UDF). Estudar uma UDF anteriormente desenvolvida e adaptá-la ao presente caso para assim conseguir simular a perda de carga devida à presença da rede no túnel (ou numa conduta);
- Definir e discretizar adequadamente o domínio para as diversas simulações numéricas: geometria da conduta com divergente;
- Realizar as simulações numéricas. Extrair resultados, processá-los e discuti-los criticamente; .

1.3 Organização da dissertação

A estrutura da dissertação divide-se em 5 capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a motivação para a realização desta dissertação, bem como os seus objetivos.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica de estudos realizados em condutas, bem como estudos onde foram testadas redes. Apresentam-se, também, os componentes de um túnel aerodinâmico e os processos de formação de escoamentos secundários.

No Capítulo 3 abordam-se as ferramentas numéricas para a execução das simulações numéricas. Mais concretamente, abordam-se, abordam-se, por exemplo, as equações RANS, modelos de turbulência, ferramentas para a discretização do domínio. Neste capítulo, também é descrito o funcionamento das UDFs. Seguidamente, é feita a definição

do domínio e respetiva discretização. Por fim, são apresentadas as alterações feitas ao divergente para o caso de comparação.

No Capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos a partir das simulações numéricas. Inicialmente é realizado o estudo de independência da malha. De seguida, é demonstrado a modelação da queda de pressão que se pretende implementar por UDF e dos fatores multiplicativos que se pretendem impor à energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta, também por UDF. Observam-se ainda resultados, para o escoamento do domínio sem rede, do domínio com rede, simuladas através das UDFs, e para o caso de comparação com um divergente de secção de entrada quadrada.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões que resultam dos resultados apresentados no Capítulo 4, bem como são feitas sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Túneis aerodinâmicos

Uma forma possível de classificar os diferentes tipos de túneis aerodinâmicos é através da velocidade do ar. Assim a divisão pode ser feita em quatro categorias : túneis subsônicos; túneis transônicos; túneis supersônicos; e túneis hipersônicos (velocidades superiores a 5 vezes a velocidade do som). O túnel aerodinâmico que se pretende desenvolver é subsônico.

Os túneis de aerodinâmicos podem ser classificados em dois tipos: túneis de circuito aberto ou fechado.

O ar que circula num túnel de circuito aberto segue um caminho direto da entrada do túnel para a saída da secção de teste prosseguindo para o difusor.

Num túnel de circuito fechado, o ar recircula continuamente sem perdas de ar.

Os dois tipos de túneis apresentam vantagens.

Para os de circuito aberto as vantagens estão relacionadas com o baixo custo para a sua construção e o facto de ser possível visualizar o escoamento com recurso a fumos sem ter a necessidade de purgar o túnel. Já as desvantagens são a necessidade de montar redes extensivas a fim de obter um escoamento com boa qualidade, o seu funcionamento requerer muita energia e o facto de estes tipos de túneis produzirem elevados níveis de ruído.

As vantagens dos túneis de circuito fechado são a elevada qualidade do escoamento, independência das condições do tempo e outras atividades que estejam a acontecer no edifício em que o túnel está instalado. Comparativamente aos túneis de circuito aberto, estes requerem menos energia e produzem menos ruído. As desvantagens são os elevados custos na construção, purgar o túnel após a utilização de fumos e ser necessário a montagem de um permutador de calor.

Pelo facto de já existir um ventilador radial que se encontra disponível no LMFTA, o túnel a ser desenvolvido será subsónico de circuito aberto e do tipo sopra.

2.2 Componentes do túnel aerodinâmico em desenvolvimento

2.2.1 Difusor

Instalado entre o ventilador e a câmara de tranquilização. Uma das funções do difusor é abrandar o escoamento e recuperar alguma da sua energia cinética na forma de aumento da pressão. Contudo, esta não é a sua principal função. A utilização do difusor vem possibilitar a introdução do convergente a jusante da câmara de tranquilização. Por sua vez o convergente irá reduzir a intensidade turbulenta. Para ser possível a introdução deste convergente é necessário que primeiro haja o aumento de área concretizado pelo difusor. A área do difusor deve aumentar gradualmente ao longo do seu eixo longitudinal de maneira a evitar a separação do escoamento. Porém este aumento de área requereria ângulos muito pequenos. Segundo Mehta e Bradshaw (1979) os ângulos das paredes do difusor e a razão de áreas não devem exceder os 5° (para uma estabilidade do escoamento, apesar de que a melhor recuperação de pressão é alcançada para ângulos de 10°) e o valor de 2,5, respetivamente .

A fim de ser possível a utilização de difusores mais curtos, pode-se recorrer à utilização de redes, introduzindo assim uma queda de pressão à saída do difusor. A queda de pressão fará com que a pressão a montante aumente, havendo, desta forma, um afastamento das linhas de corrente dentro do difusor, evitando a separação do escoamento. A escolha adequada da rede permitirá um escoamento sempre aderente às paredes.

Segundo Metha e Bradshaw (1979) aconselham que em pequenos túneis os cantos sejam arredondados de forma a reduzir o risco de grandes regiões de separação do escoamento. Para difusores com $A > 5$ e $2\theta > 50^\circ$, sendo A a relação de áreas e 2θ o ângulo do difusor, a utilização da rede, como método de controlo da camada limite, poderá não ser suficiente.

2.2.2 Rede e câmara de tranquilização

A câmara de tranquilização, que se situa à saída do divergente, contem as redes. A rede impõe uma queda de pressão estática proporcional ao quadrado da velocidade e assim reduz a espessura da camada limite no divergente (Mehta and Bradshaw, 1979).

A utilização da *User Defined Function* tem como objetivo simular a queda de pressão imposta ao escoamento quando este passa pela rede.

As redes são utilizadas para melhorar a qualidade do escoamento nos túneis de vento desde 1930.

Apesar do coeficiente de queda de pressão ser definido como

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (2.1)$$

em condutas finitas, medir Δp como uma diferença na pressão estática através da rede leva a erros. Medindo $p_1 - p_2$ num túnel finito, está a medir-se a queda de pressão real através da secção transversal menos a queda na pressão dinâmica através da rede devido a efeitos de deslocamento da camada limite. Com isto, para todas as medições em condutas finitas, a queda de pressão deve ser medida como a diferença nas pressões totais.

Apesar de não haver conformidade em relação à formulação para prever K , a estabelecida por Wieghardt,

$$K = 6,5 \left[\frac{1 - \beta}{\beta^2} \right] \left[\frac{Ud}{\beta v} \right]^{-0,33} \quad (2.2)$$

foi considerada a mais precisa na sua previsão, para velocidades entre os 0 e os 20 m/s.

De forma a conseguir reduzir a turbulência de forma efetiva a porosidade, β de uma rede deve ser entre 0,58-0,8.

Valores de porosidade superiores a 0,8 não são adequados para um bom controlo de turbulência. Valores inferiores 0,58 levam a instabilidade do escoamento.

2.2.3 Convergente

O convergente é o último componente antes da secção de testes. O estudo deste componente foi anteriormente realizado pelo Pereira (2016). É um constituinte muito importante a fim de garantir uma boa qualidade do escoamento. O convergente acelera a dissipação dos vórtices garantindo um escoamento uniforme na secção de testes.

A conceção da sua geometria, nomeadamente o seu comprimento e rácio de áreas, são um ponto crítico uma vez que não se pretende gerar separações do escoamento nem bolhas de recirculação. A geometria deve ser suave de modo a acompanhar as linhas de corrente.

O comprimento do divergente influencia a intensidade turbulenta na secção de teste. Assim, o comprimento deve ser pequeno de forma a minimizar o crescimento da camada limite. O escoamento ao deixar a secção de saída deve ser uniforme (Mathew et al., 2005).

Relativamente ao rácio de áreas entre a secção de entrada e a secção de saída deve ser o mais elevado possível de maneira a reduzir a perda de pressão criada pela passagem do escoamento pela rede localizada na câmara de tranquilização (Brusca et al., 2011 in: Pereira (2006)). Bell e Mehta (1988) in: Pereira (2006) aconselham um rácio entre 6 e 10 para 1. Rácios inferiores a 6 produzem perdas de carga elevadas no escoamento, enquanto que rácios superiores a 10 levam a dimensões excessivas de entrada.

2.2.4 Outro equipamentos e acessórios

Existem outros componentes que completam o túnel aerodinâmico como o ventilador, o sinobloco e a união flexível.

O ventilador que será utilizado no túnel em desenvolvimento já existe no LMFTA. É um ventilador radial da marca METEC/F.lli Ferrari, Modelo FR-631 N4A, sendo a razão pela qual o túnel a ser desenvolvido ser de sopro. Este ventilador utiliza um variador de velocidades Siemens de 7,50 kW de 4 pólos e 50 Hz. A velocidade máxima que o escoamento atinge à saída é de 20 m/s. A área da sua secção de saída é de $635 \times 448 \text{ mm}^2$.

O sinobloco por um lado deverá absorver grande parte das vibrações causadas pelo ventilador, evitando a propagação destas através do pavimento à restante estrutura metálica que compõe o túnel aerodinâmico, e por outro lado elevar a cota do centro da secção de saída de 1122 mm para 1200mm, de maneira que fique alinhado com o centro da secção de saída do convergente.

Por fim, a união flexível para além de fazer a ligação entre o ventilador e o difusor, também evita a propagação das vibrações mecânicas provenientes do ventilador.

2.3 Parâmetros do escoamento

2.3.1 Intensidade turbulenta

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a intensidade turbulenta, I , é definida como a razão entre o desvio padrão das flutuações da velocidade, u' , e da velocidade média do escoamento, u_{avg} .

O valor de intensidade turbulenta de 1% ou menos é considerado baixo e valores superiores a 10% são considerados elevados (*ANSYS Fluent Theory Guide*, ,2013).

Para escoamentos completamente desenvolvidos, a intensidade turbulenta pode ser estimada a partir da seguinte correlação empírica para escoamentos em tubos (*ANSYS Fluent Theory Guide*, ,2013):

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} = 0,16(Re_{Dh})^{-1/8} \quad (2.3)$$

O número de Reynolds, Re , e diâmetro hidráulico, com base em White (2011), são :

$$Re = \frac{\rho D_h U_\infty}{\mu} \quad (2.4)$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.5)$$

Onde ρ é a massa volúmica do fluido, U_∞ a velocidade do escoamento médio, μ a viscosidade dinâmica, A a área da secção transversal e P o perímetro da secção transversal. Um ponto do escoamento livre no caso de uma conduta é um ponto que se situa fora da conduta.

2.3.2 Coeficiente de pressão

O coeficiente de pressão, C_p , é calculado através da expressão (White,2011):

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \quad (2.6)$$

Com q_∞ sendo a pressão dinâmica (White,2011):

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \quad (2.7)$$

Onde p_∞ corresponde à pressão do escoamento médio e p à pressão num ponto arbitrário do

Este parâmetro será utilizado no estudo de independência da malha.

2.4 Escoamento através de redes

2.4.1 Perturbação do escoamento a jusante da rede

Baines e Peterson (1951) detetaram uma instabilidade no escoamento de redes de baixa porosidade através do facto de existirem diferenças apreciáveis entre os perfis expectáveis e os medidos a jusante. Eles atribuíram a causa destes resultados a pequenas variações no diâmetro e espaçamento dos fios, produzindo variações significativas na velocidade e pressão, de modo que o escoamento através de cada elemento da rede pudesse coalescer ou divergir com o escoamento do elemento vizinho de forma aleatória. Este efeito ocorreu apenas para redes com valores de porosidade inferiores a 0,5.

Morgan (1960) e Bradshaw (1964) sugeriram que nesta coalescência os escoamentos através de cada elemento não estivessem ortogonais à rede e, como mostrou Bradshaw (1963), pudessem dar origem a vórtices no escoamento a jusante. Bradshaw (1964) estabeleceu que redes com porosidades inferiores a 0,57 podiam provocar este fenómeno e, por isso, o seu uso devia ser evitado em túneis aerodinâmicos, uma vez que os efeitos causados seriam grandes devido à perturbação da camada limite nos modelos de escoamento.

A utilização de redes a fim de melhorar a qualidade do escoamento foi sugerido pela primeira vez por Prandtl (1932).

O problema da redução de turbulência através de redes contém diversas características interessantes de como os turbilhões de diferentes escalas interagem. A montante existe uma redistribuição da pressão e uma contração do escoamento no plano central da rede. A jusante formam-se camadas finas de corte e vórtices caso o número de Reynolds, Re_d , baseado no diâmetro dos fios, for suficientemente grande ($Re_d \gtrsim 40$). Outro parâmetro que influencia a queda de pressão que ocorre aquando da passagem do fluido pela rede é a opacidade, σ , definida como a área sólida projetada por unidade de área total. Para valores de σ superiores a 0,5 o escoamento torna-se instável devido à coalescência dos jatos. Deste modo, redes para a redução de turbulência devem ter valores de opacidade inferiores a este valor.

No estudo de Groth e Johansson (1988) foi estudado a redução de turbulência através de redes. Foram colocadas dois "favos de abelha" e quatro redes a fim de eliminar turbilhões e perturbações no escoamento introduzidas pelo ventilador. A turbulência foi gerada por uma grelha de hastes em madeira.

Como se pode observar na tabela 2.1 foram utilizadas 6 redes supercríticas ($Re_d \geq 40$) e uma rede subcrítica ($Re_d < 40$). A opacidade nas sete redes utilizadas foi sempre inferior a 0,44 a fim de evitar a coalescência dos jatos.

Tabela 2.1: Características da grelha e das redes. Valores do número de Reynolds e coeficientes de queda de pressão para uma velocidade média de 5 m/s. Fonte: Groth e Johansson, 1988

No	Redes (in. ⁻¹)	Diâmetro do fio (mm)	Opacidade	Re_d	K
1	2,1	2,50	0,37	830	0,68
2	4,9	1,00	0,35	330	0,66
3	7,9	0,50	0,29	170	0,49
4	12,1	0,50	0,42	170	0,99
5	19,0	0,24	0,33	80	0,79
6	34,0	0,19	0,44	65	1,64
7	147,0	0,04	0,41	13	2,90
Grelha	1,0	6,00	0,42	2000	

A dependência do coeficiente de queda de pressão, K , no número de Reynolds e na opacidade pode ser expressa:

$$K \equiv \frac{\Delta p_{stat}}{0,5\rho U^2} = f(Re_d) \frac{1 - (1 - \sigma)^2}{(1 - \sigma)^2} \quad (2.8)$$

onde ρ é a massa volúmica e $f(Re_d)$ é uma função empírica.

Na figura 2.1 pode observar-se os resultados obtidos por Groth e Johansson (1988) para o efeito de uma rede supercrítica ($Re_d \geq 40$) na intensidade turbulenta. A intensidade turbulenta diminui quando o escoamento se aproxima da rede a montante devido ao efeito da contração e redistribuição da pressão. Na zona próxima da rede a jusante, a intensidade turbulenta é maior do que se não houvesse rede. Este efeito acontece devido à formação de vórtices devido à passagem do escoamento pelos fios e às camadas finas de corte, que originam elevadas intensidades turbulentas de pequena escala, que contudo acabam por diminuir rapidamente. Quando apenas uma rede é utilizada foi determinado que a distância necessária para a intensidade turbulenta diminuir até valores inferiores aos de entrada é de aproximadamente 15 vezes a largura da rede para redes supercríticas.

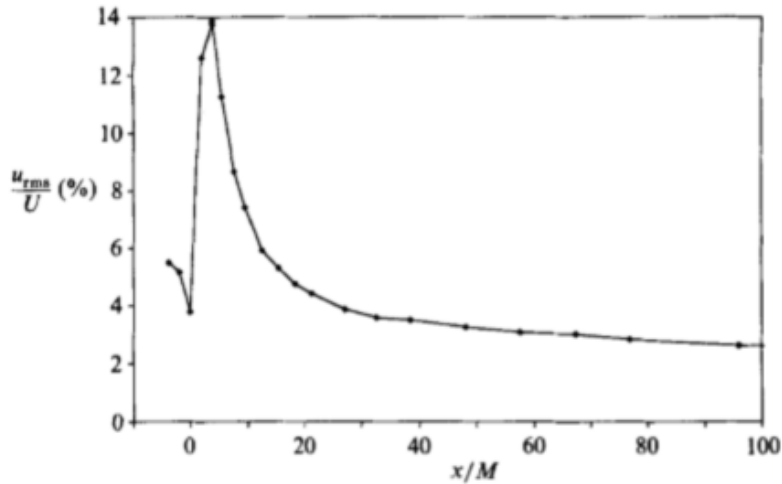


Figura 2.1: Exemplo do efeito de uma rede supercrítica na intensidade turbulenta do escoamento (largura da malha $M=0,52$ cm, $\sigma=0,35$ e $Re_d \approx 330$). Fonte: Groth e Johansson, 1988.

Groth e Johansson (1988) também testaram neste estudo a utilização de combinações de redes, tendo concluído que redes subcríticas apresentam maiores reduções de turbulência, contudo o facto de criarem maiores quedas de pressão torna-as pouco práticas para utilização quando comparadas com a utilização de combinações de redes supercríticas.

2.4.2 Efeito da rede na uniformidade do escoamento

Os primeiros métodos de geração de perfis de velocidade e controlo de escoamentos eram principalmente através da tentativa e erro.

A primeira grande tentativa de um projeto teórico de uma grelha para produzir um determinado perfil de velocidades foi em 1957 por Owen e Zienkiewicz, que inseriram uma grelha, na entrada da secção de trabalho de um túnel de aerodinâmico de baixa turbulência, com hastes paralelas e espaçamento variável (figura 2.2). A função desta grelha era produzir uma variação linear na pressão total a grandes distâncias a jusante sem introduzir grandes gradientes na pressão estática próximo da grelha.

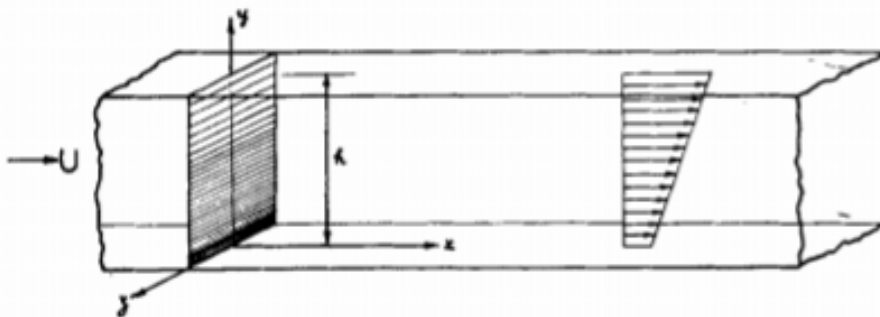


Figura 2.2: Disposição da grelha e sistema de coordenadas. Fonte: Owen e Zienkiewicz, 1957

Ao descreverem o escoamento através da grelha em termos dos coeficientes de queda de pressão e deflexão, foram capazes de obter uma relação entre o perfil a jusante e espaçamento entre as hastes, assumindo que o perfil a montante era uniforme e que os desvios no escoamento da uniformidade eram pequenos.

Os resultados obtidos experimentalmente estavam relativamente próximos dos resultados teóricos. Com este estudo, Owen e Zienkiewicz não evidenciaram a existência de qualquer escoamento secundário de larga escala que acompanhasse a camada de corte nem nenhuma tendência deste diminuir com o aumento da distância à grelha.

Em 1959 Elder levou a cabo um estudo cujo foco principal era o escoamento bidimensional estável dentro de um canal onde foi colocada uma rede feita de fios de gaze com forma arbitrária. A atenção estava no escoamento a jusante da rede e linearizou as equações de movimento para o escoamento através da rede com base em certas suposições. Elder (1959) obteve uma relação entre os perfis de velocidade a montante e a jusante da rede, a forma da rede, e a variação do coeficiente de queda de pressão do escoamento, K , ao descrever as condições do escoamento em termos de K e do coeficiente de deflexão, B .

Embora neste caso seja considerado caso bidimensional, esta teoria também pode ser aplicada a escoamentos axissimétricos em tubos e anéis e em escoamentos em condutas convergentes ou divergentes. Elder (1959) também estudou o escoamento através de múltiplas redes, contudo este caso foi estudado mais detalhadamente por Davis (1957).

Owen e Zienkiewicz (1957) observaram que os perfis a jusante se separavam perto das paredes formando uma "saliência". Uma ocorrência semelhante foi evidenciada por Lau e Baines (1968) aquando da passagem do fluido pela rede. Eles demonstraram que redes com $K > 1$ causariam uma "saliência" na camada limite e quanto maiores os valores de K maior a "saliência". Por esta razão, recomendaram que, se possível, redes com $K > 4$ não deviam ser utilizadas.

2.5 Escoamentos secundários

Escoamentos secundários é o termo geral usado para designar o campo dos escoamentos transversais com componentes V e W no plano perpendicular ao eixo x , sendo x a direção do escoamento principal. O primeiro tipo de escoamento secundário é o resultado do desenvolvimento da vorticidade média ao longo do escoamento e induzida pela torção do escoamento no plano de corte médio. O mecanismo de formação de tal escoamento (primeiro de tipo de escoamento secundário de Prandtl's) é essencialmente não viscoso. Em contraste, o segundo tipo de escoamento secundário é um efeito puramente viscoso e é causado pelo gradiente das tensões de Reynolds ao longo do escoamento na direção dos eixos y e z . Com isto, este tipo de escoamento (segundo tipo de escoamento secundário de Prandtl's) representa o fenómeno que resulta completamente da anisotropia turbulenta, e, em contraste com o primeiro tipo de escoamento secundário, não pode surgir no escoamento laminar de um fluido Newtoniano nem em canais cilíndricos. Os escoamentos secundários surgem em zonas de canto devido aos mecanismos complexos de interação

entre tensões turbulentas e gradientes de pressão ao longo das isolinhas. Um efeito óbvio destes escoamentos é alterarem muito o escoamento principal. Contudo, os escoamentos secundários não podem ser considerados apenas como um fenómeno negativo. Estes escoamentos promovem a convecção transversal da turbulência que por sua vez dá energia ao escoamento de baixo momento na região do canto. Este efeito contraria qualquer tendência para a separação que possa surgir devido a um gradiente adverso de pressão.

Nos escoamentos de canto de uma conduta de secção transversal quadrada ou retangular o gradiente de velocidade na direcção x (direcção longitudinal do escoamento) é muito inferior aos gradientes na direcção y e z , ou seja, $\frac{dU}{dx} \ll \frac{dU}{dy} \sim \frac{dU}{dz}$. Aqui os gradientes de tensões normais e de tensões de corte tanto na direcção y como na direcção z são importantes e, porque $\frac{dU}{dz}$ é da mesma ordem que $\frac{dU}{dy}$, não podemos esperar extensões simples dos modelos bidimensionais funcionem.

Os escoamentos secundários transportam o momento e a energia do escoamento principal em direcção à parede em algumas regiões e para longe da parede em outras regiões. Assim, as linhas de corrente do escoamento médio em condutas não circulares são helicoidais, ao contrário das linhas de corrente retas nas condutas circulares. Nikuradse (1926) foi provavelmente o primeiro a notar as diferenças entre escoamentos em condutas circulares e condutas quadradas. Linhas de velocidade constante são deslocadas em direcção aos cantos e afastadas do ponto médio das paredes comparando com as linhas do escoamento laminar. Prandtl (1927) sugeriu que seria o resultado de escoamentos secundários em direcção aos cantos, o que para satisfazer a continuidade, requeriam um escoamento de retorno no ponto médio das paredes. Foi também reconhecido que estas deslocações eram resultado de flutuações turbulentas ao longo das isolinhas de velocidade dando origem a um escoamento normal à isolinha de velocidade sempre que ocorresse uma variação na curvatura. Hoagland (1960) observou que o padrão do escoamento era precisamente aquele previsto por Prandtl.

Para escoamentos em condutas de secção transversal não circular, o eixo x_1 é definido na direcção da linha central da conduta. x_2 e x_3 são coordenadas ortogonais na secção transversal lateral (figura 2.3). U_1 representa o escoamento principal, U_2 e U_3 descrevem os escoamentos secundários.

$\Omega_1 = \partial U_3 / \partial x_2 - \partial U_2 / \partial x_3$, apenas existe se as velocidades laterais nas direcções x_2 e x_3 existirem e vice versa. Numa secção transversal de uma conduta a vorticidade é difundida a partir de regiões de alta intensidade para de baixa intensidade. Num escoamento laminar numa conduta as tensões de Reynolds não existem. Desta forma, escoamentos secundários não podem ocorrer pelo facto dos mecansimos do escoamento servirem apenas para transportar e destruir vorticidade.

O estudo experimental de Brundrett e Baines (1964) foi realizado numa conduta longa de secção quadrada.

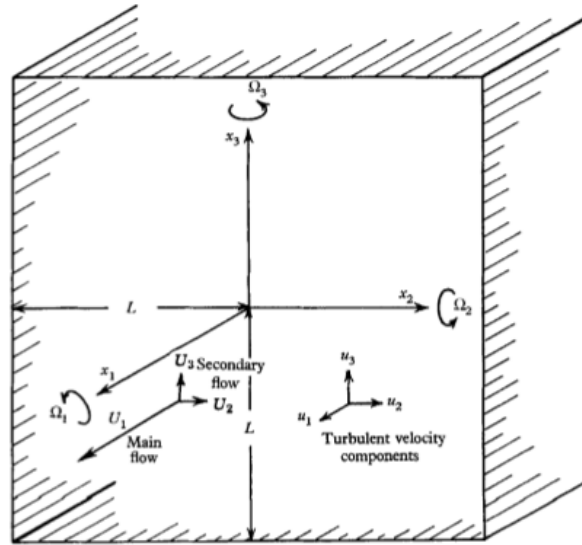


Figura 2.3: Coordenadas de um escoamento numa conduta quadrada. Fonte: Brundrett e Baines, 1964

A figura 2.4 demonstra o padrão das isolinhas para a velocidade média determinado por Leutheusser (1963). É evidente a distorção das isolinhas nas regiões próximas do canto.

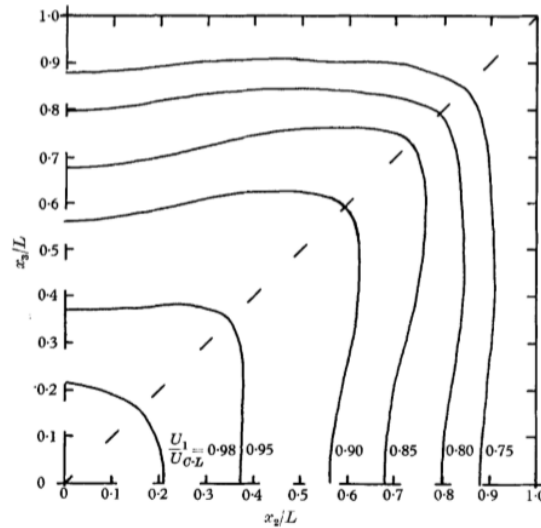


Figura 2.4: Isolinhas da velocidade axial para um escoamento numa conduta quadrada. Fonte: Leutheusser, 1963

Na figura 2.5a é possível observar que a energia turbulenta tem o seu valor mínimo no centro e o seu valor máximo na região da parede, onde a turbulência tem origem. Também é evidente que o campo de turbulência é mais distorcido pelo escoamento secundário do que o campo da velocidade média.

A figura 2.5b confirma o padrão da corrente secundária, anteriormente previsto por

Prandtl, e é inferior em magnitude relativamente às velocidades turbulentas a partir da quais surge.

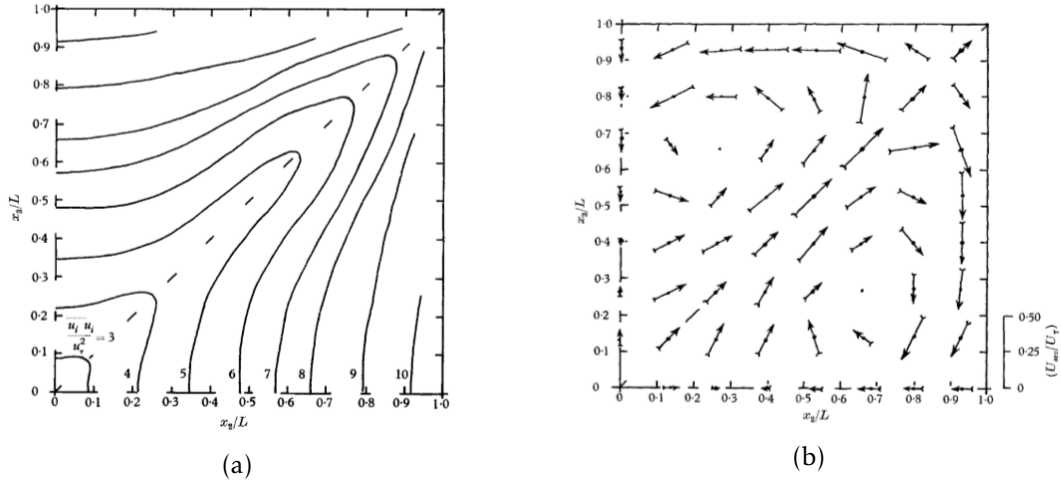


Figura 2.5: (a) Linhas de energia cinética turbulenta constante e (b) escoamento secundário numa conduta quadrada. Fonte: Brundrett e Baines, 1964.

O campo de vorticidade em torno de $x=1$, obtido por Hoagland (1960) é demonstrado na figura 2.6, confirmado por Brundrett e Braines (1964) no seu estudo.

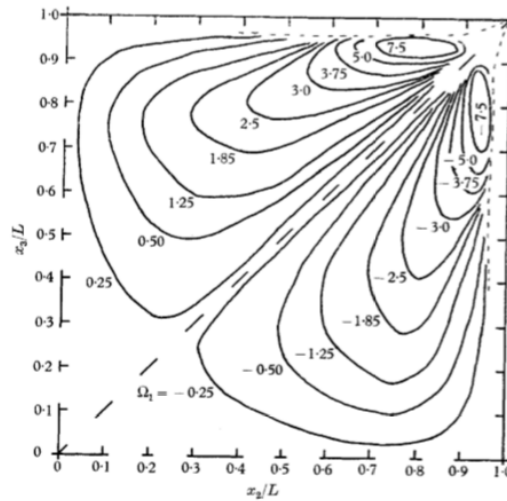


Figura 2.6: Linhas de vorticidade constante Ω (adimensional). Fonte: Hoagland, 1960

2.5.0.1 Outros tipos de secções transversais

Em escoamentos turbulentos em secções triangulares e retangulares, as tensões de corte são praticamente constantes ao longo dos lados, caindo acentuadamente para zero nos cantos, devendo-se ao fenómeno do escoamento secundário. Nikuradse (1926), na sua dissertação, demonstrou os padrões da velocidade axial e do escoamento secundário (figura

2.7). É possível observar que no caso da secção triangular o padrão do escoamento secundário corresponde a seis células de escoamento em contra rotação nos quais o escoamento é direcionado a partir do centro da secção em direcção aos cantos através dos bissetores dos cantos. O escoamento retorna ao longo da parede. Ally et al. (1978) determinaram que o valor máximo das velocidades secundárias foi de aproximadamente 1.5 % do valor da velocidade média axial, numa conduta em que a secção transversal é um triângulo equilátero, estando de acordo com os valores mencionados por Speziale et al. (1982) para condutas não circulares.

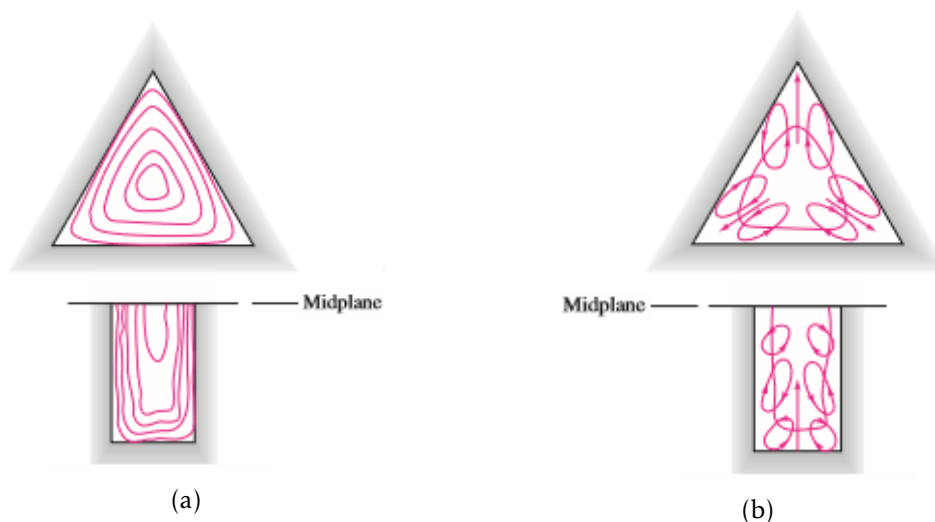


Figura 2.7: (a) Contornos da velocidade axial média e (b) escoamentos secundários medidos por Nikuradse (1926) na sua dissertação. Fonte: White, 2011.

Hurst e Rapley (1989) realizaram medições numa conduta cuja secção transversal era um triângulo reto, com um ângulo de 60° . Com este estudo pretendeu-se que a secção transversal não tivesse quaisquer planos de simetria, ao contrário do que acontece com a maioria das secções transversais não circulares, esperando-se que o escoamento fosse totalmente influenciado pelas paredes da conduta. Em secções com planos de simetria o efeito da parede é reduzido uma vez que na maioria dos casos pode ser feita uma abordagem unidimensional na região da parede.

As medições confirmaram o mesmo padrão de escoamento secundário da figura 2.7b, com o escoamento a partir do núcleo em direcção aos cantos, retornando ao núcleo através da zona da parede.

Na figura 2.8a pode-se observar os contornos da velocidade axial para dois números de Reynolds extremos, normalizada com a velocidade média axial. Como seria de esperar há uma maior penetração do escoamento nos ângulos menos agudos, bem como uma grande dependência do número de Reynolds nas regiões mais afastadas do núcleo.

As circulações do escoamento secundário são demonstradas na figura 2.8b. O efeito de transporte convectivo destes escoamentos transversais na velocidade axial local, desloca

os contornos na direção do escoamento, empurrando-o para os cantos e para longe das paredes nas regiões da parede.

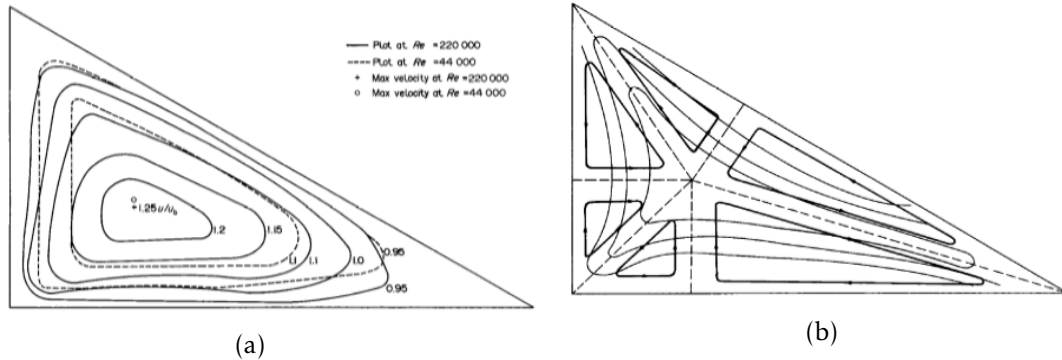


Figura 2.8: (a) Velocidade axial e (b) circulações do escoamento secundário. Fonte: Hurst e Rapley, 1989.

Os perfis da figura 2.9 indicam que este estudo realizado por Hurst e Rapley (1989) obteve valores mais elevados de energia cinética turbulenta, próximo da parede, do que os encontrados no estudo do triângulo equilátero e em Brundrett e Baines (1964) no estudo do quadrado. Assim, concluiu-se que os elevados níveis de energia cinética turbulenta devem-se, mais provavelmente, à forma da conduta do que ao número de Reynolds da conduta.

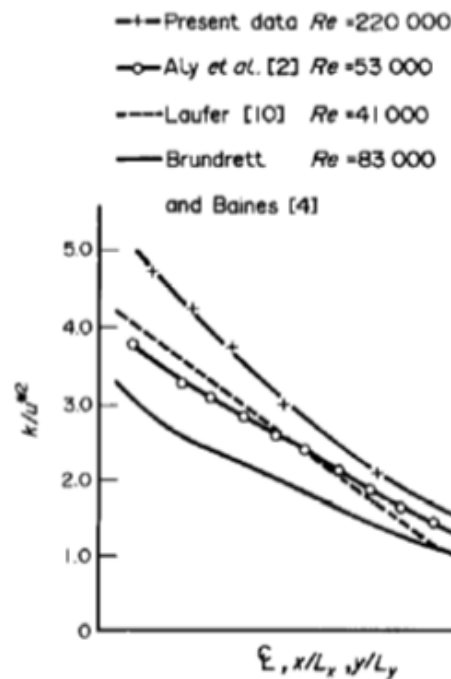


Figura 2.9: Energia cinética turbulenta (k/u^2) ao longo da bissetriz média da parede. Fonte: Hurst e Rapley, 1989.

MODELOS NUMÉRICOS

3.1 Equações RANS

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que descrevem os fenômenos de escoamento de fluidos e permitem determinar os campos de velocidade e pressão num escoamento. Estas equações não só descrevem temporal e espacialmente os campos de pressão e velocidade do escoamento, como também as tensões e a massa volumétrica. Os métodos numéricos utilizados nos estudos dos efeitos da turbulência podem ser agrupados nos seguintes grupos: *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS), *Large eddy simulation* (LES) e *Direct numerical simulation* (DNS).

Contudo para a maioria dos casos em engenharia não é necessário resolver os detalhes das flutuações da turbulência, basta saber a informação sobre as propriedades médias temporais do escoamento (por exemplo, velocidades médias, pressões médias, etc). Assim, a maioria das simulações de escoamentos turbulentos é baseada nas equações RANS, por necessitarem de um menor esforço computacional.

Nas equações RANS as variáveis são compostas pelo seu valor médio e pelas respectivas flutuações. No caso da velocidade temos, por exemplo, o seguinte:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3.1)$$

Sendo \bar{u}_i e u'_i as componentes da velocidade média e das flutuações da velocidade ($i=1,2,3$), respetivamente.

Desta forma, as equações RANS são obtidas por aplicação do conceito de média temporal às equações da continuidade (equação 3.2) e da quantidade de movimento (equação 3.3). Com base em White (2011) e Versteeg e Malalasekera (2007), podem ser

descritas em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.3)$$

Com u_i e u_j a corresponder ao campo de velocidades nas direções principais; p ao campo de pressão; t ao tempo; ν à viscosidade cinemática; ρ à massa específica; e i, j aos índices 1, 2, 3 diretrizes de x, y e z .

Para escoamentos com número de Mach inferior a 0,3 pode considerar-se o escoamento incompressível (White, 2011). Tendo em conta que a velocidade correspondente ao número de Mach referido (para um gás ideal, $T = 20^\circ\text{C}$) é de 100 m/s e as simulações que serão levadas a cabo, poderá considerar-se a válida a hipótese de escoamento incompressível para esta dissertação. Assim, as anteriores equações poderão ser simplificadas, uma vez que a massa volúmica é constante, para:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.5)$$

Embora as equações de *Navier-Stokes* tenham um número limitado de soluções analíticas, é comum recorrer-se a ferramentas computacionais de modo a resolver estas equações. Assim, a fim de resolver as equações RANS, nesta dissertação, recorre-se à ferramenta computacional *ANSYS FLUENT*. Esta ferramenta baseia-se no método dos volumes finitos para discretizar o domínio numérico. Para discretização do domínio e posterior geração da malha, utilizam-se as ferramentas *ANSYS Workbench* e *ANSYS Meshing*, respetivamente. Tendo esta parte realizada, o passo seguinte é a escolha do modelo de turbulência adequado, de modo a ser possível a resolução das equações mencionadas anteriormente.

3.2 Breve descrição dos modelos de turbulência

A fim de ser possível simular escoamentos turbulentos com as equações RANS é necessário desenvolver modelos de turbulência de modo a prever as tensões de Reynolds e os termos de transporte escalar. Para um modelo de turbulência ser útil num código de Dinâmica dos Fluidos Computacional com um propósito geral, este deve ter uma larga aplicabilidade, ser preciso, simples e pouco dispendioso para simular. Os modelos de turbulência RANS mais comuns são classificados com base no número de equações de transporte adicionais que precisam ser resolvidas juntamente com as equações RANS.

Boussinesq propôs que as tensões de Reynolds pudessem ser proporcionais às variações médias de deformação provocadas pelos gradientes de velocidade do escoamento

médio, baseando-se no conceito de viscosidade turbulenta. Assim temos (Versteeg e Malalasekera, 2007):

$$R_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.6)$$

Onde k é a energia cinética turbulenta por unidade de massa, expressa da seguinte forma:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.7)$$

Quanto μ_t , é a constante de proporcionalidade denominada por viscosidade turbulenta. O segundo termo do lado direito inclui δ_{ij} denominado por Kronecker ($\delta_{ij}=1$ se $i=j$ e $\delta_{ij}=0$ se $i \neq j$)

A escolha do modelo de turbulência é um passo importante na modelação de problemas em CFD uma vez que é um critério que condiciona os resultados. Dado que neste caso de estudo dá-se maior importância às perdas de carga impostas pela rede do que as impostas pela rugosidade das paredes, destacam-se, assim, os modelos $k-\epsilon$ padrão e $k-\epsilon$ *realizable*. Na secção seguinte descrevem-se as características dos modelos mencionados anteriormente com base na informação encontrada em *ANSYS Fluent Theory Guide* (2013) e Versteeg e Malalasekera (2007).

3.2.1 $k-\epsilon$ Standard

Este modelo, proposto Launder e Spalding, é um modelo semi-empírico baseado nas equações de transporte para a energia cinética de turbulência (k) e a sua taxa de dissipação (ϵ). A robustez e precisão razoável para uma ampla gama de escoamentos turbulentos são algumas das suas características. Para este modelo é feita a suposição de que o escoamento é totalmente turbulento e os efeitos da viscosidade molecular são insignificantes.

A produção e a destruição de energia cinética turbulenta k estão sempre ligadas. A taxa de dissipação ϵ é maior onde a produção de k é maior. A produção e a destruição de ϵ é proporcional à produção e à destruição de k , respetivamente.

Assim, ϵ aumenta rapidamente se k aumentar rapidamente, e diminui suficientemente rápido de modo a evitar valores negativos de energia cinética turbulenta, caso k diminua.

Concluindo, o modelo $k-\epsilon$ Standard apresenta vantagens como ser um modelo de turbulência simples, no qual apenas precisam ser fornecidas as condições iniciais e de fronteira; excelente desempenho para muitos escoamentos industrialmente relevantes; está bem estabelecido, sendo o modelo de turbulência mais amplamente validado.

Contudo também apresenta desvantagens como baixo desempenho para uma variedade importante de escoamentos como: alguns casos de escoamentos não confinados; escoamentos com grandes deformações extra (por exemplo, escoamentos com vórtices); escoamentos rotativos; escoamentos conduzidos pela anisotropia das tensões normais de Reynolds (por exemplo, escoamentos completamente desenvolvidos em condutas que não sejam circulares).

3.2.2 k - ϵ Realizable

O modelo k - ϵ Realizable é um modelo relativamente recente e difere do modelo k - ϵ padrão pelo facto de conter uma formulação diferente para a viscosidade turbulenta e por uma nova equação de transporte para a taxa de dissipação, ϵ , ter sido derivada a partir de uma equação exata para o transporte das flutuações da vorticidade quadrática média. O termo *Realizable* significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas nas tensões de Reynolds, de acordo com a física dos escoamentos turbulentos. Este modelo é mais provável de apresentar melhores desempenhos para escoamentos que envolvem rotações, camadas limite sujeitas a fortes gradientes de pressão adversos, separação e recirculação. Uma das desvantagens do modelo k - ϵ Realizable é que produz viscosidades turbulentas não físicas em casos que o domínio computacional contém zonas com fluidos rotacionais e estacionários.

3.2.3 RSM

Diversas desvantagens do modelo k - ϵ surgem quando é necessário modelar escoamentos com campos de deformação complexos. Nestas condições as tensões individuais de Reynolds são insuficientemente representadas pela equação 3.6, mesmo que a energia cinética turbulenta seja calculada com uma precisão razoável. A equação de transporte exata das tensões de Reynolds, por outro lado, já é capaz de ter em conta os efeitos direcionais do campo de tensões de Reynolds.

O modelo *Reynolds Stress Model* (RSM) calcula as equações de transporte para as tensões de Reynolds juntamente com o cálculo de uma equação para a taxa de dissipação. Assim, são necessárias cinco equações de transporte adicionais para escoamentos 2D e sete equações de transporte adicionais para o caso do 3D.

A fidelidade das previsões deste modelo é por vezes limitada devido às suposições impostas para calcular determinados termos nas equações de transporte para as tensões de Reynolds. A modelação dos termos de pressão-deformação e da taxa de dissipação é particularmente desafiadora, sendo por vezes considerada responsável por comprometer a precisão das previsões deste modelo.

O RSM nem sempre produz resultados que sejam claramente melhores do que os resultados obtidos através de modelos mais simples para todos os tipos de escoamentos de modo a compensar o esforço computacional adicional. Contudo, o RSM deve ser utilizado quando as características do escoamento que se pretendem analisar resultam da anisotropia nas tensões de Reynolds. Desta forma, um exemplo de escoamento são os escoamentos secundários induzidos por tensões em condutas.

3.3 Definição e discretização do domínio

3.3.1 Critérios de qualidade de malha

Segundo *ANSYS Fluent Theory guide*, 2013, a qualidade da malha tem uma grande importância na precisão e estabilidade da simulação numérica.

Independentemente do tipo de malha utilizada no nosso domínio, a verificação da qualidade da malha é essencial. Dependendo do tipo de células utilizadas, diferentes tipos de critérios podem ser avaliados:

- *Aspect ratio*- este critério é uma medida do alongamento das células. para escoamentos muito anisotrópicos, *aspect ratio* extremos podem produzir resultados precisos com menos células. Normalmente é preferível evitar proporções acima de 5:1 nas zonas do escoamento longe das paredes. As células quadrilaterais / hexaédricas dentro da camada limite podem ser alongadas para proporções até 10:1, na maior parte dos casos. Em relação à estabilidade da solução do escoamento, este critério pode tomar valores de proporções tão altas quanto possível. Contudo devido à estabilidade da solução de energia, os valores devem ser mantidos abaixo de 35:1.
- *Skewness*- diferença entre o formato da célula e o formato da célula equivalente em termos de volume. Para malhas triangulares/tetraédricas o valor máximo deve ser inferior a 0,95.
- *Orthogonal Quality* - tem o mesmo significado do critério *Aspect ratio*, contudo é calculado de maneira diferente.

3.3.2 Funções de parede

Na periferia de superfícies sólidas, verifica-se que à medida que a distância na direção normal à superfície vai aumentando, a velocidade do escoamento aproxima-se da velocidade do escoamento, sendo comum definir como espessura da camada limite onde a velocidade do escoamento é 99% da velocidade do escoamento médio.

Devido à presença da fronteira sólida, o comportamento do escoamento e a estrutura da turbulência na região próxima da parede são diferentes dos escoamentos turbulentos livres. Em escoamentos ao longo de uma parede existe uma região, longe da parede, dominada pela inércia e uma camada fina, próxima da parede, onde os efeitos viscosos são importantes.

Próximo da parede o escoamento é influenciado pelos efeitos viscosos e este não depende dos parâmetros do escoamento livre.

Longe da parede é esperado que a velocidade num ponto seja influenciada pelo efeito retardador da parede através do valor da tensão de corte da parede, mas não pela viscosidade em si.

É possível dividir escoamentos turbulentos próximos de uma parede em três regiões diferentes:

- Sub camada viscosa- na superfície sólida o fluido é estacionário. O comportamento do fluido próximo da parede é dominado por efeitos viscosos. Esta camada é extremamente fina ($y^+ < 5$);
- Camada da lei logarítmica- ($30 < y^+ < 500$) região onde os efeitos viscosos e turbulentos são ambos importantes;
- Camada exterior- camada onde da parede, livre dos efeitos viscosos, predominando assim os efeitos turbulentos.

O valor de y^+ é expresso por, (White,1999):

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu} \quad (3.8)$$

Onde u^* é a velocidade de atrito, y é a distância vertical entre a parede e o centro da célula adjacente, e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Segundo o manual *ANSYS Fluent Theory Guide*, no *ANSYS FLUENT* a lei logarítmica é usada para valores de $y^+ > 11,225$. As funções de parede para a velocidade média são baseadas na unidade da parede, y^* , em vez do y^+ .

3.3.3 Condições de fronteira

Todos os problemas de simulação numérica são definidos em termos de condições iniciais e de fronteira.

Para esta dissertação as condições de fronteira que serão definidas são: as de entrada, as sólidas, as de simetria e as de saída.

3.3.3.1 Condições de fronteira de entrada

A fronteira de entrada é designada no *FLUENT* por *Velocity inlet*.

De acordo com o escoamento que se pretenda simular, é possível definir vários parâmetros. Para o presente trabalho serão definidas as seguintes condições:

- Magnitude da velocidade, com direção normal à fronteira;
- Intensidade Turbulenta e Diâmetro Hidráulico. Outra forma de especificar a turbulência seria através da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação turbulenta. Contudo em alguns casos é mais apropriado especificar um valor uniforme da quantidade de turbulência, como por exemplo, fluidos que entram numa conduta ou escoamentos completamente desenvolvidos em condutas, onde os perfis perfis precisos da quantidade de turbulência são desconhecidos. Dado que o nosso caso se

aproxima de um escoamento completamente desenvolvido numa conduta, decidiu-se especificar a turbulência através dos valores de intensidade turbulenta e diâmetro hidráulico à entrada;

3.3.3.2 Condições de fronteira sólida

As condições de fronteira sólida, denominadas no *FLUENT* por parede, são as condições mais frequentes em problemas de fluidos confinados. Com esta condição o escoamento passa a depender dos efeitos viscosos, condicionando a geração da camada limite. Para escoamentos sobre superfícies rugosas, como é o caso das paredes do túnel de aerodinâmico, os efeitos rugosos podem afetar a transferência de massa. Assim, é possível incluir estes efeitos através da lei de parede para a rugosidade. Contudo como as perdas de carga devido à rede são bastantes superiores às perdas de carga devido à rugosidade da parede, estes efeitos rugosos serão desprezados.

Para as simulações realizadas nesta dissertação irá considerar-se que a parede é não deslizante.

3.3.3.3 Condições de fronteira de simetria

A fronteira de simetria é utilizada quando a geometria em estudo apresenta uma distribuição simétrica do escoamento em relação a um plano.

O *ANSYS FLUENT* assume que:

- a velocidade normal a um plano de simetria é zero;
- gradientes normais ao plano de simetria de uma dada variável são nulos;

3.3.3.4 Condições de fronteira de saída

Como fronteira de saída pode-se impor uma das seguintes condições:

A condição *Pressure Outlet* requer a especificação da pressão estática à saída, ou seja, é utilizada quando se sabe a pressão na fronteira de saída. Este valor de pressão estática apenas é utilizado enquanto o escoamento permanece subsônico. Se o escoamento passar a ser supersônico este valor de pressão extrapolado com base no escoamento no interior do domínio. Caso haja inversão da direção do escoamento próximo da fronteira de saída, durante o processamento da solução, um conjunto de condições de retorno do escoamento deve ser especificado, como por exemplo, a direção e se a pressão é total ou estática, de modo a facilitar a convergência da solução. A condição *pressure outlet* obriga a que as linhas de corrente sejam paralelas entre si na secção onde a condição é imposta, o que na realidade pode não acontecer.

A condição de *Outflow* é utilizada quando a velocidade e pressão do escoamento à saída não são conhecidas, *a priori*. Deste modo não definimos quaisquer condições nas condições de *Outflow* (exceto casos de transferência de calor por radiação, escoamento de massa dividido ou se estivermos a modelar uma fase discreta de partículas), o *ANSYS*

FLUENT extrapola a partir do escoamento no interior do domínio. Contudo este tipo de fronteira tem limitações, e por isso, não pode ser utilizada em certos casos: se o problema incluir condições de fronteira *pressure inlet*, é necessário utilizar condições de fronteira *pressure outlet*; se estivermos a modelar escoamentos compressíveis; se estivermos a modelar escoamentos em que a densidade varie, mesmo que sejam incompressíveis; com modelos multifásicos.

Assim, nesta dissertação optou-se por utilizar a condição de saída *Outflow* uma vez que na condição *pressure outlet* existe a obrigação de paralelismo entre as linhas de corrente na saída e caso haja retorno do escoamento próximo da saída a necessidade de especificação de certas condições, algo que não acontece para a condição *Outflow*.

3.3.4 User Defined Functions

Uma *User Defined Function*(UDF) é uma função programável pelo utilizador que pode ser dinamicamente interligada ao *solver* do *Fluent* a fim de melhorar as características padrão do código. Estas funções são escritas em linguagem de programação C e são definidas através da utilização de *DEFINE* macros disponíveis no *ANSYS Fluent Manual UDF*. Estas macros permitem modificar propriedades do escoamento como, por exemplo, a densidade, a velocidade, a pressão, entre outras. Qualquer UDF contém a diretiva de inclusão do *udf.h* no início do ficheiro do código, de maneira a que as *DEFINE* macros possam ser incluídas durante o processo de compilação ou interpretação.

Os valores que passam das UDFs para o *solver* ou os valores que retornam do *solver* para as UDFs devem ser expressos em unidades S.I.

3.3.4.1 Descrição das macros

O objetivo da utilização de UDFs, no caso desta tese, é simular a presença da rede. Deste modo, recorreu-se à macro *DEFINE_SOURCE*. Esta macro é usada para especificar os termos fonte dos diferentes tipos de equações de transporte, mais precisamente as equações da continuidade, dos momentos, da energia cinética turbulenta, da taxa de dissipação de turbulência, entre outras.

O modo de utilização é *DEFINE_SOURCE(name, c, t, dS, eqn)*, em que:

- *name*- nome da Udf;
- *c*(cell thread)- indica as células onde o termo fonte vai ser aplicado;
- *t*(thread)- ponteiro para o segmento de células;
- *dS*- matriz que contém a derivada do termo fonte em função da variável dependente da equação de transporte;
- *eqn*- número da equação;

A derivação do termo fonte pode ser utilizada para linearizar o termo fonte melhorando a estabilidade da solução. De modo a ilustrar o que foi dito anteriormente, o termo fonte pode ser expresso através da equação 1, onde ϕ é a variável dependente, A a parte explícita do termo fonte e $B\phi$ a parte implícita.

$$S_{\phi} = A + B\phi \quad (3.9)$$

Ao especificar o valor para B é possível melhorar a estabilidade da solução e ajuda as taxas de convergência devido a um incremento dos termos diagonais na matriz de solução. O utilizador tem ainda a opção de definir o termo $dS[eqn]$ como $dS/d\phi$, ou então forçar a solução explícita do termo fonte definindo-o igual a zero. Como UDFs de propriedade, os termos fonte das UDFs são chamados pelo *Fluent* num loop em segmentos de células. O *solver* transfere para a UDF onde está implementada a macro *DEFINE_SOURCE* todas as variáveis que precisa para definir um termo fonte personalizado, uma vez que são resolvidas individualmente para cada célula. Consequentemente a UDF não necessitará de fazer o *loop* sobre as células no segmento uma vez que o *Fluent* já o faz.

3.3.4.2 Interpretação ou compilação de UDFs

Para que uma UDF seja implementada existem dois processos: o de compilação e o de interpretação. A principal diferença entre UDFs compiladas e UDFs interpretadas, é que as últimas não podem aceder à informação do *solver* do programa através de referências de estrutura direta; apenas podem aceder indiretamente aos dados através de macros que o *Fluent* fornece. Fazendo agora um resumo das diferenças entre os dois processos:

- UDFs Interpretadas
 - São transportáveis para outras plataformas;
 - Podem ser executadas como UDFs compiladas;
 - Não necessitam de um compilador C;
 - São mais lentas do que as UDFs compiladas;
 - Estão restringidas ao uso de linguagem de programação C;
 - Não podem vinculadas a bibliotecas do utilizador;
 - Podem aceder a dados armazenados na estrutura do *Fluent* apenas através de macros predefinidas;
- UDFs Compiladas
 - Executam mais rapidamente do que as UDFs interpretadas;
 - Não estão restringidas ao uso da linguagem de programação C;
 - Podem chamar funções escritas em outras funções, dependendo da linguagem do compilador;

- Não podem ser executadas como UDFs interpretadas se contiverem elementos da linguagem C que o interpretador não consegue detetar;

Assim no momento de decisão sobre qual processo escolher, é preciso ter em conta que o processo de compilação é utilizado para funções complexas, ou seja, que têm uma necessidade significativa de CPU, como as UDFs de propriedade. Como o caso da macro *DEFINE_SOURCE* é uma UDF de propriedade, o processo escolhido é o de compilação.

3.3.5 Domínio

Depois de seleccionada a opção *FLUID FLOW (FLUENT)*, o *ANSYS* disponibiliza duas opções a fim de gerar a geometria, uma é o *Design Modeler* e a outra é *Spaceclaim*. Também existe a opção de recorrer a outras ferramentas CAD, como o *SOLIDWORKS*, de modo a gerar a geometria pretendida e posteriormente importar para o gerador de malha.

Como a geometria utilizada nesta dissertação é pouco complexa, em qualquer um dos geradores disponíveis no *ANSYS* seria possível de obter a geometria pretendida de forma relativamente simples.

Contudo optou-se pela ferramenta *Design Modeler* em vez do *Spaceclaim* pelo facto da primeira possuir uma estrutura em árvore, o que facilita a alteração de dimensões de forma rápida.

Tendo em conta a simetria do divergente optou-se por utilizar como domínio de estudo apenas um quarto.

Na figura 3.1 está representada a geometria obtida.

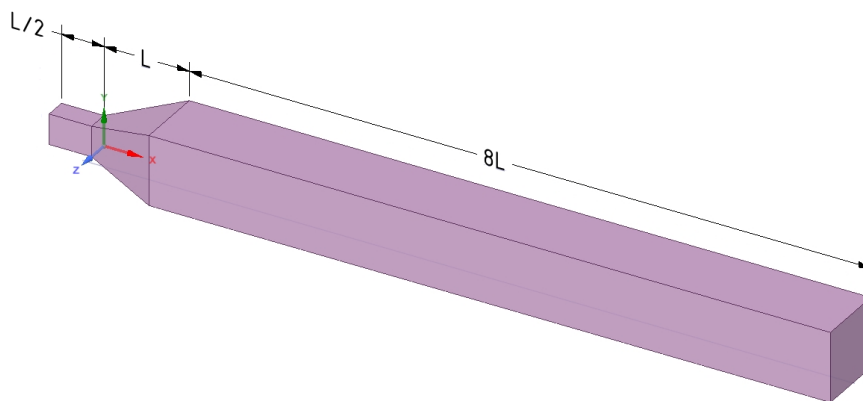


Figura 3.1: Geometria do domínio

A geometria utilizada pode ser dividida em três partes: o divergente e os troços a montante e a jusante deste. É de referir que o domínio em estudo não representa o túnel aerodinâmico completo, uma vez que não está representado o convergente que é um

componente com grande importância. Nesta dissertação apenas se está a estudar o divergente. A geometria e as dimensões do divergente basearam-se no que já existe no LMFTA. Assim, este componente possui uma área de entrada de $320 \times 226,5 \text{ mm}^2$ e uma área de saída de $735 \times 735 \text{ mm}^2$. A definição dos comprimentos dos troços a montante e a jusante baseou-se no comprimento na direção longitudinal do divergente, $L = 895 \text{ mm}$. De modo a garantir que não houvesse separação do escoamento logo à entrada do divergente atribuiu-se o comprimento de $L/2$ para o troço a montante. A fim de dar espaço para que o escoamento se desenvolvesse completamente atribuiu-se o comprimento de $8L$ para o troço a jusante

É de notar que a origem do referencial situa-se na entrada do divergente, aspeto a ter em conta na análise dos gráficos no capítulo 4.

3.4 Definição de malhas

Nesta secção apresenta-se as metodologias utilizadas para a geração das malhas, com recurso à ferramenta *ANSYS Meshing*. Na definição das malhas é necessário ter em conta o limite de elementos disponíveis para a versão utilizada. Neste estudo a versão usada é a de estudante, que tem o limite de 512 000 elementos. O computador utilizado para a realização da formulação CFD do problema possui as seguintes capacidades de processamento: Intel(R) Core(TM) i7-4710HQ CPU-2,50Hz, RAM 16,00GB.

3.4.1 Malha

De forma obter uma malha estruturada (figura 3.2) utilizou-se o método *Multizone Quad/Tri*, dada a sua capacidade em implementar uma malha uniforme ao longo de todo o domínio, e sempre que necessário implementar elementos que melhor descrevam as superfícies complexas.

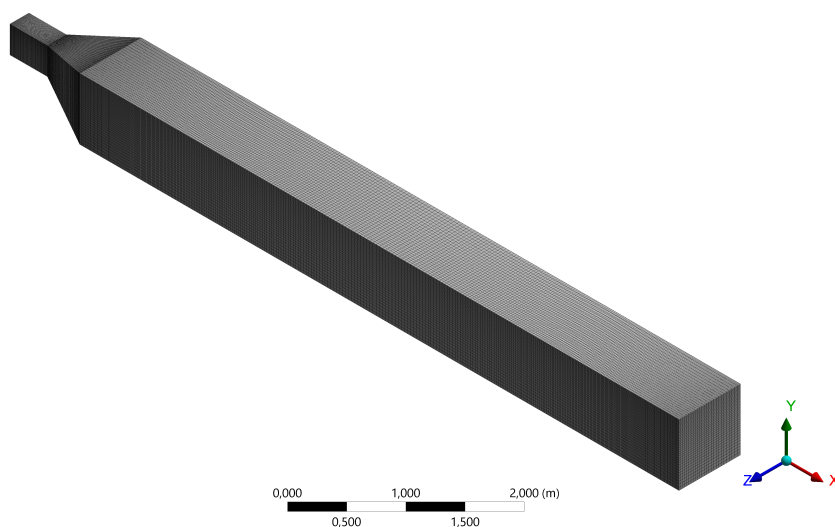


Figura 3.2: Vista isométrica Malha do domínio em estudo.

Neste estudo deu-se maior importância às zonas de entrada e saída do divergente e das secções a montante e a jusante deste, e também às zonas de canto. Assim recorreu-se à ferramenta *Bias* a fim de por um lado tornar a malha mais refinada nessas zonas e por outro poupar elementos. Na figura 3.3 é possível verificar que na zona do canto é malha é mais refinada de forma a apanhar melhor a camada limite.

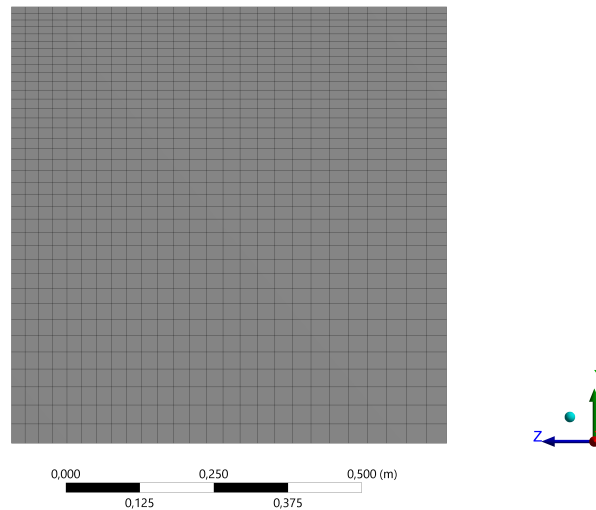


Figura 3.3: Malha da secção de saída do domínio em estudo.

3.4.2 Seleção das condições de fronteira

Depois da geração da malha é essencial a definição das condições de fronteira, uma vez que as equações RANS respeitam as condições impostas às fronteiras que delimitam o domínio. Para este estudo, o domínio utilizado é composto por 6 faces, figura 3.4:

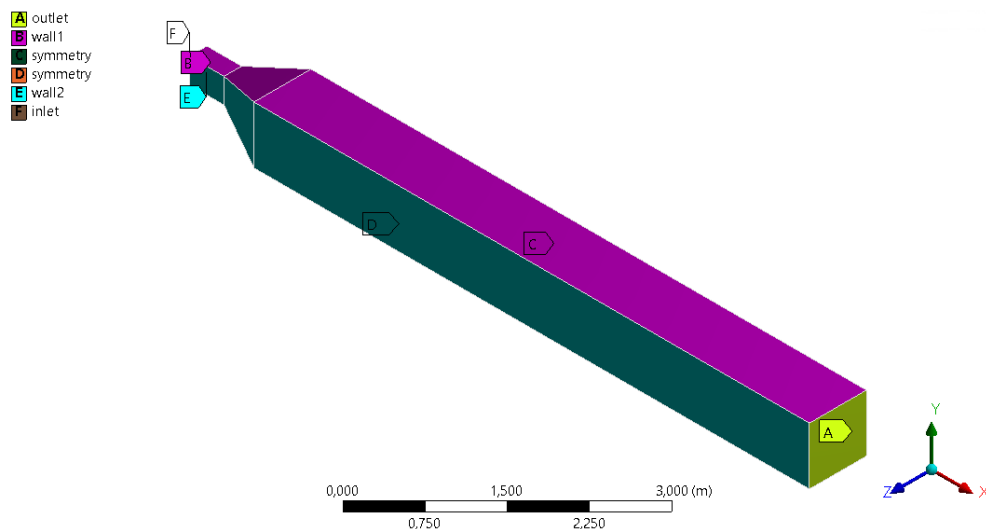


Figura 3.4: Identificação das fronteiras do domínio nas simulações numéricas

3.5. COMPARAÇÃO COM CASO DE UM DIFUSOR COM SECCÇÃO DE ENTRADA QUADRADA

O domínio não possui faces interiores de modo a recriar a rede, onde seriam impostas condições disponíveis pelo programa ou onde seria implementada a UDF. Na tabela 3.1 está presente a tipologia referente a cada condição de fronteira do domínio.

Tabela 3.1: Tipologia das condições de fronteira para o domínio em estudo

Nome da fronteira	Referência	Condição de fronteira
Outlet	A	Outflow
wall1	B	wall
symmetry	C	symmetry
symmetry	D	symmetry
wall2	E	wall
inlet	F	Velocity-inlet

Quando se formula o problema no *ANSYS FLUENT*, há principalmente duas condições que são especificadas, a condição *velocity-inlet* para a entrada e a condição *pressure-outlet* para a saída.

Para a condição de entrada são especificados os valores da velocidade, com base no Re_{Le} (equação 3.10) da secção a montante do divergente, a intensidade turbulenta e o diâmetro hidráulico da secção de entrada.

$$Re_{Le} = \frac{ULe}{\nu_{ar_{20^\circ}}} \quad (3.10)$$

Onde Re_{Le} é o número de Reynolds com base no comprimento da secção, U é a velocidade de entrada, Le é o comprimento da secção e $\nu_{ar_{20^\circ}}$ é a viscosidade cinemática do ar a 20°C ($\nu_{ar_{20^\circ}} = 1,509 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$). Tendo em conta as velocidades a que o túnel que está a ser construído irá funcionar, optou-se por utilizar um $Re_{Le} = 10^5$, obtendo-se, assim, uma velocidade de entrada $U = 3,372 \text{ m/s}$.

3.5 Comparação com caso de um difusor com seccção de entrada quadrada

No divergente existente no LMFTA há uma passagem de uma secção de entrada retangular para uma secção de saída quadrada. A fim de perceber as consequências desta mudança do tipo de secção entre entrada e saída, realizou-se um estudo em que se comparou o divergente em estudo com um divergente com secção transversal de entrada.

A secção de saída foi mantida igual. As alterações realizadas foram ao nível da secção de entrada e do comprimento do divergente. Estas alterações tiveram como base manter o maior ângulo de abertura do divergente e a mesma área da secção de entrada, de modo a manter a relação de áreas entre entrada e saída, obrigando a alterar o comprimento do divergente.

Ao observar as figuras 3.5a e 3.5b, optou-se por manter o ângulo de $29,6^\circ$. Relativamente à aresta do quadrado da secção de entrada, uma vez que a área da secção retangular é de 72480 mm^2 , obteve-se uma aresta com $269,22 \text{ mm}$. Com isto, foi necessário diminuir o comprimento do divergente, para um valor de $L=820 \text{ mm}$. Assim, obteve-se a vista em planta presente na figura 3.4c, que é igual à principal.

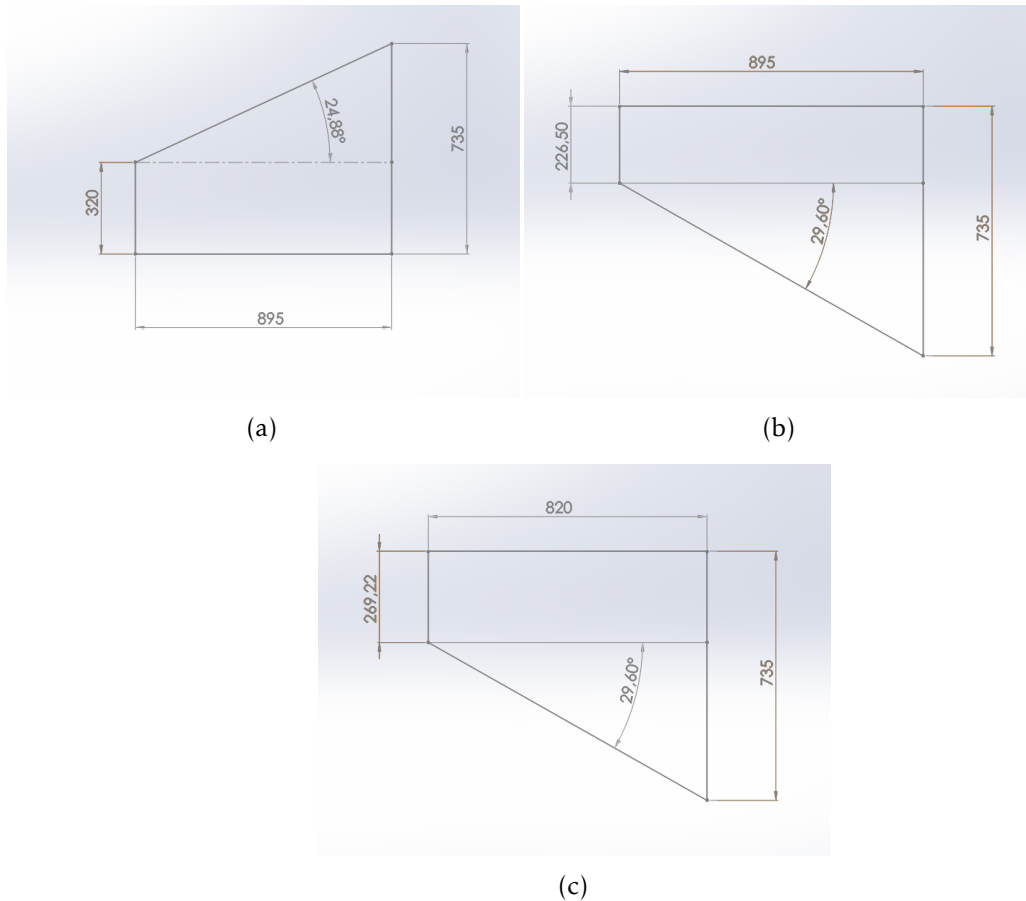


Figura 3.5: Vistas (a) principal do difusor em estudo; (b) em planta do difusor em estudo; (c) em planta do difusor para comparação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo de independência de malha

O estudo de independência de malha é essencial nos estudos em que se recorre às simulações numéricas, pelo facto de se poder verificar a influência da dimensão dos elementos do domínio nos resultados. Neste estudo comparou-se o coeficiente de pressão das paredes do domínio das diferentes malhas. A diferenciação entre as malhas baseou-se em aumentar o número total de elementos, aplicando o fator multiplicativo N ao número de elementos em cada direção. Para além de utilizar o coeficiente pressão das paredes, C_p , como parâmetro no estudo de independência de malha, teve-se ainda em conta os critérios de qualidade de malha apresentados na secção 3.3.1.

Tabela 4.1: Descrição das Malhas do domínio utilizado nas simulações

Identificador da Malha	N	Nº de Elementos
Malha 1	1	9 450
Malha 2	2	75 600
Malha 3	3	255 150
Malha 4	3,5	413 875
Malha 5	3,7	481 000

Na tabela 4.2 é possível observar que o coeficiente de pressão das paredes vai diminuindo com o aumento do número de elementos, como seria de esperar. Com este aumento, o coeficiente de pressão tende a convergir para um determinado valor, uma vez que os valores de malha para malha vão-se aproximando cada vez mais. Contudo, não foi

possível continuar a aumentar o número de elementos, dado que o limite de número de elementos disponíveis pelo *ANSYS* para a versão estudante é de 512 000 elementos, e ao aplicar um fator multiplicativo de 3,8 este limite já seria ultrapassado.

Tabela 4.2: Coeficiente de Pressão das diferentes malhas para o estudo de independência de malha

Identificador	Coeficiente de Pressão, C_p	
	wall1	wall2
Malha 1	4,452	4,428
Malha 2	3,605	3,570
Malha 3	3,123	3,164
Malha 4	2,960	3,000
Malha 5	2,900	2,941

Por outro lado a avaliação da malha passa também pela análise dos valores dos parâmetros que se encontram na tabela que se segue e pela comparação destes com os valores pré estabelecidos anteriormente na secção 3.3.1:

Tabela 4.3: Critérios de qualidade das diferentes malhas

Identificador	Aspect ratio (máx)	Skewness (máx)	Orthogonal Quality (min)
Malha 1	4,890	0,3289	0,820
Malha 2	4,660	0,3289	0,813
Malha 3	4,664	0,3289	0,8107
Malha 4	4,571	0,3290	0,810
Malha 5	4,647	0,3290	0,810

De acordo com os valores estabelecidos para cada parâmetro, é possível observar que todas as malhas se encontram dentro dos valores padrão.

No final de cada iteração, a soma residual para cada variável é calculada e guardada, registando, desta forma, o histórico da convergência.

Num computador com precisão infinita, os resíduos iriam convergir para zero. Como este computador não existe, os resíduos decrescem para um valor pequeno (o chamado "*round-off*") e deixam de variar (o chamado "*level out*"). Para simulações de precisão única (utilizado na maioria das estações de trabalho e computadores) os resíduos podem diminuir até seis casas decimais antes de atingir o "*round-off*".

Não havendo uma forma universal de avaliar a convergência, uma vez que as definições dos resíduos que são úteis para um dado problema podem ser enganosas para outro. Assim, pode-se assumir uma boa convergência quando os resíduos diminuem progressivamente e ao atingirem um certo patamar, o valor do resíduo não oscila ao longo de sucessivas iterações.

No estudo da independência da malha foram registados na tabela 4.4 os valores dos resíduos de cada variável para as diferentes malhas utilizadas:

Tabela 4.4: Resíduos das simulações numéricas das malhas utilizadas para o estudo de independência de malha

Identificador	Continuidade (m^3/s) 10^{-5}	$u(m/s)$ 10^{-7}	$v(m/s)$ 10^{-7}	$w(m/s)$ 10^{-7}	$k(m^2/s^2)$ 10^{-7}	$\epsilon(m^2/s^3)$ 10^{-7}
Malha 1	0,052214	1,3350	1,0771	0,71829	0,70320	0,83909
Malha 2	0,39267	1,5916	2,8704	0,89993	2,9639	2,8841
Malha 3	0,82789	1,0820	3,1229	0,73645	3,6227	4,5354
Malha 4	2,2720	1,2628	3,7065	1,0601	4,7906	6,0388
Malha 5	1,7369	1,5632	4,8937	1,3824	5,9388	8,4991

Constata-se que para a *Malha 1* os resíduos da continuidade são da mesma ordem de grandeza dos resíduos das componentes u e v da velocidade, e uma ordem superior aos valores das restantes variáveis. Relativamente à *Malha 2* e à *Malha 3* os valores dos resíduos da continuidade são, aproximadamente, uma ordem de grandeza superior aos valores das restantes variáveis. No caso da *Malha 4* e *Malha 5* verifica-se que os valores dos resíduos da continuidade são duas ordens de grandeza superiores aos valores dos resíduos das restantes variáveis. Tendo em conta os resultados, conclui-se que globalmente a diminuição da dimensão dos elementos globalmente não contribui significativamente para a variação dos níveis de resíduos.

4.2 Funções de parede

Como nesta dissertação o valor da queda de pressão imposta pela rede é superior ao valor da queda de pressão imposta pela rugosidade das paredes, pretendeu-se que o parâmetro y^+ estivesse incluído na região logarítmica. Como se referiu anteriormente a região logarítmica é válida para valores de y^+ entre 30 e 500. No caso do *ANSYS FLUENT* as funções de parede para a velocidade média são baseadas na unidade da parede, y^* , em vez do y^+ , e a lei logarítmica é aplicável para $y^* > 11,225$. Na figura 4.1 está representado o contorno do parâmetro y^* obtido para a malha utilizada nas simulações, tendo em conta que se pretendia que os valores de y^* fossem superiores a 11,225.

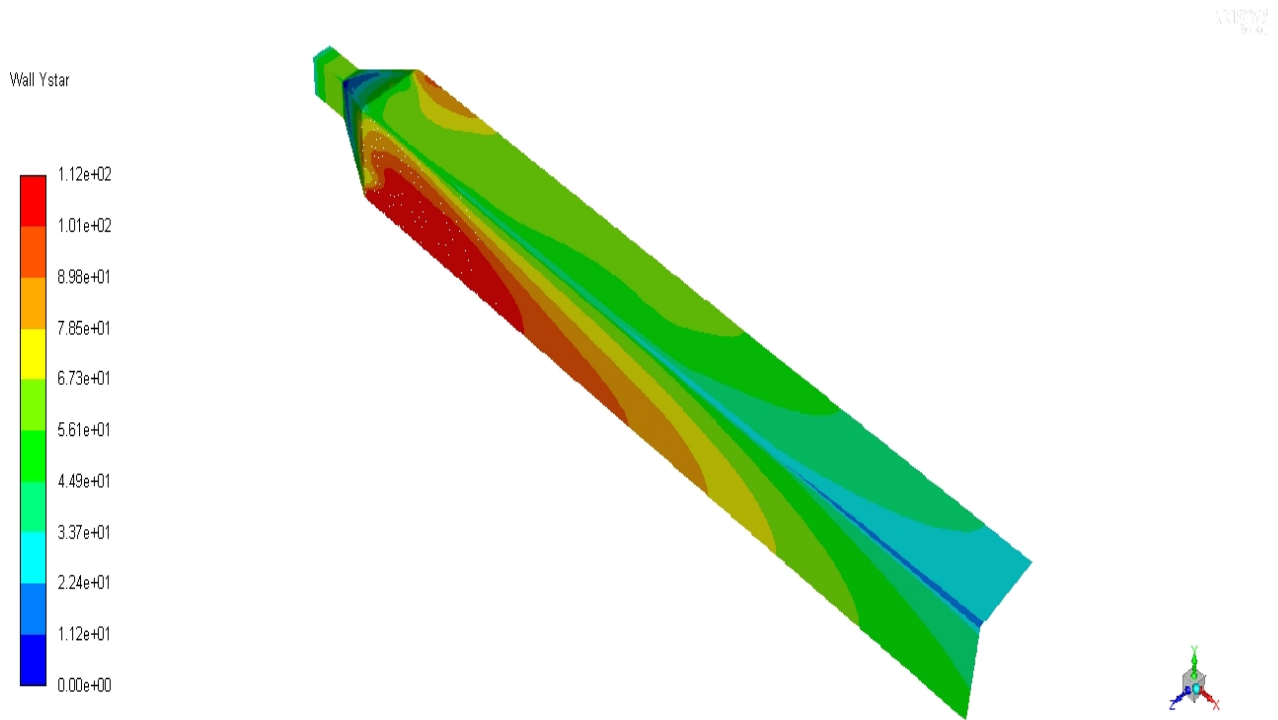


Figura 4.1: Contorno y^+ nas paredes do domínio.

4.3 User Defined Functions (UDF)

Nesta subcapítulo define-se as UDF que modelam os efeitos nos escoamento devido à introdução da rede. Em primeiro lugar modela-se a queda de pressão, resultante da perda de carga imposta pela rede. Em segundo lugar adicionam-se fatores multiplicativos à energia cinética turbulenta e à taxa de dissipação turbulenta de maneira a simular os efeitos que a rede tem nestas duas variáveis.

4.3.1 Queda de pressão através da rede

Para a UDF da queda de pressão teve-se como base uma UDF anteriormente em Mateus (2018). Por manipulação equação 2.1 obtemos a equação:

$$\Delta p = K \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (4.1)$$

De seguida selecciona-se a macro *DEFINE_SOURCE* a fim de introduzir a queda de pressão através da UDF como um termo fonte na equação de transporte do momento em x , uma vez que esta é a direção do escoamento.

O termo *source* corresponde à equação 4.1. De forma a facilitar a convergência da solução, deriva-se esta expressão em ordem à velocidade.

4.3.2 Aplicação de fatores multiplicativos à energia cinética turbulenta e à taxa de dissipação turbulenta

Numa região a jusante próxima do plano da rede a intensidade turbulenta é mais elevada do que se não houvesse rede. Este aumento acontece devido ao desdobramento de vórtices e às camadas de corte dos fios da rede.

De forma a simular este efeito recorreu-se a UDFs, onde se aplicaram fatores multiplicativos à energia cinética turbulenta e à taxa de dissipação turbulenta. Uma vez que o objetivo era simular o aumento da intensidade turbulenta, impuseram-se fatores que fizessem aumentar a a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação turbulenta aquando da passagem do escoamento pelo plano da rede.

É necessário o aumento da taxa de dissipação turbulenta de modo a acompanhar o aumento da energia cinética turbulenta. A equação 4.2 dada pelo *FLUENT* relaciona estas duas variáveis.

$$\varepsilon = c_{\mu}^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}} l^{-1}. \quad (4.2)$$

Ou seja, aplicando um fator multiplicativo à energia cinética de 1.2 significa que se aplica um fator de 1.3145 à taxa de dissipação turbulenta.

De seguida seleciona-se a macro *DEFINE SOURCE* a fim de introduzir os fatores multiplicativos para a energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta como um termo fonte nas equação da energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta, respetivamente.

É de referenciar que em todas as figuras onde estejam representadas secções transversais do domínio, o eixo da conduta situa-se no canto inferior esquerdo da secção.

Tanto a UDF da queda de pressão como as UDFs da energia cinética turbulenta e da sua taxa de dissipação têm a sua estrutura e código presentes no Apêndice A

4.4 Caso sem rede

Foram realizadas simulações do domínio para os modelos *k-ε Standard*, *k-ε Realizable* e *Reynolds Stress Model*.

Na figura 4.2 é possível observar a evolução da velocidade longitudinal para planos distribuídos desde a entrada do divergente até metade do troço a jusante deste. Os três modelos detetaram uma zona de recirculação que se desenvolve dentro do divergente e prolonga-se, aproximadamente, até metade do troço a jusante, variando ligeiramente a dimensão da bolha de recirculação consoante o modelo utilizado. Esta zona de recirculação manifesta-se nas regiões onde a V_x é negativa, significando que existe um retorno do escoamento, tendo nestas regiões o sentido oposto do escoamento principal.

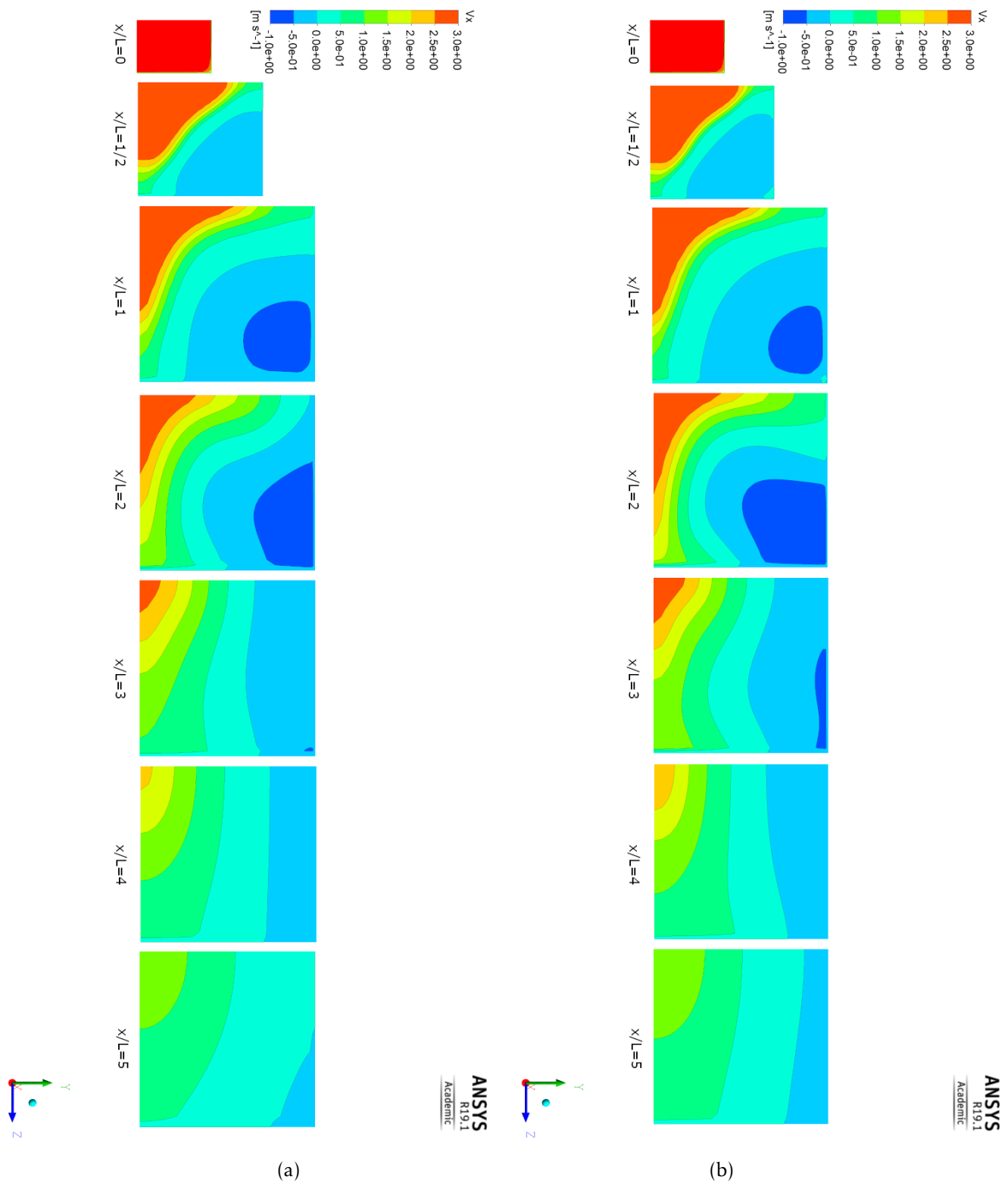


Figura 4.2: Evolução da velocidade longitudinal para os modelos (a) $k-\epsilon$ Standard; (b) $k-\epsilon$ Realizable; (c) RSM (continua).

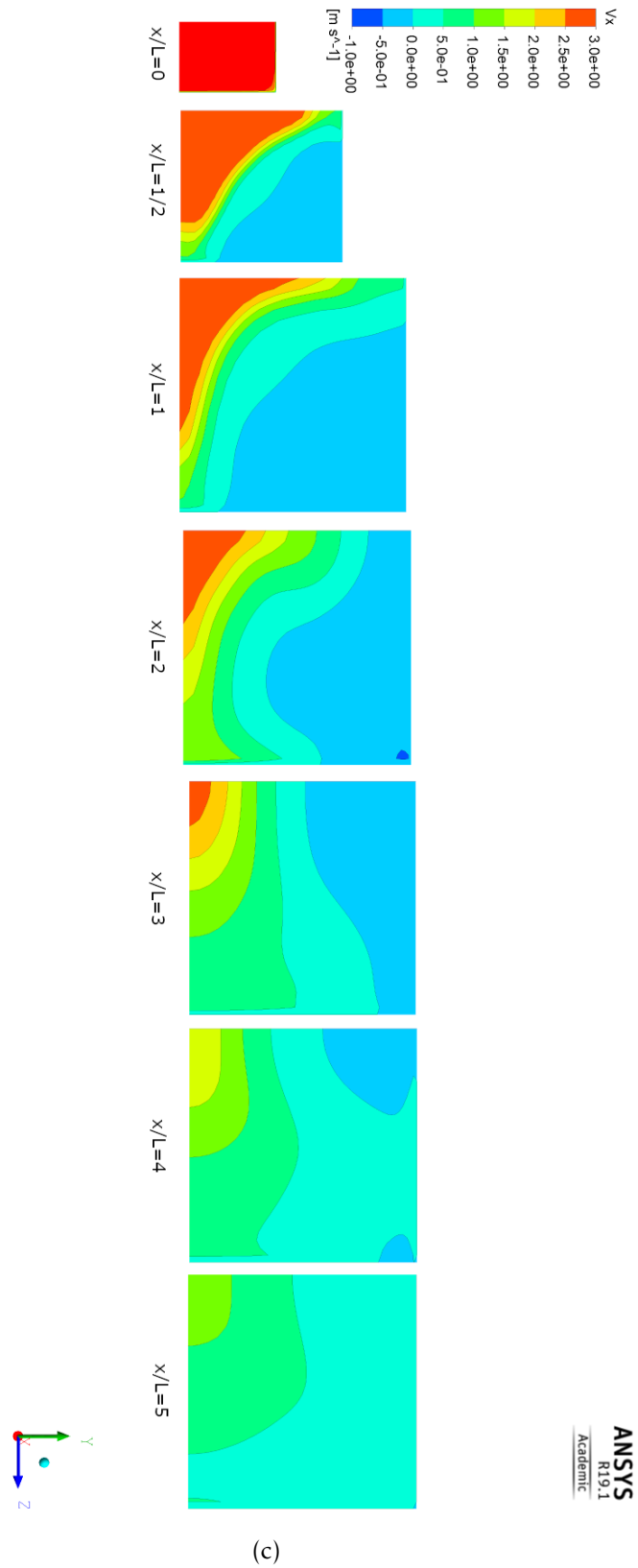


Figura 4.2: Evolução da velocidade longitudinal para os modelos (a) $k-\epsilon$ Standard; (b) $k-\epsilon$ Realizable; (c) RSM (continuação).

As pequenas diferenças encontradas entre os modelos simulados, nomeadamente ao nível do tamanho da bolha de recirculação, consideram-se pouco relevantes, tendo em conta o objetivo desta dissertação, não se justificando apresentar resultados para os todos os modelos de turbulência no resto da secção de resultados.

Os escoamentos secundários presentes no domínio são causados por gradiente das tensões de Reynolds ao longo do escoamento nas direções y e z . Segundo a literatura encontrada, o modelo aconselhado para escoamentos induzidos por tensões é o modelo RSM, tendo-se optado assim, por apresentar resultados apenas para este modelo.

A figura 4.3 permite ter uma noção mais precisa da dimensão das bolhas de recirculação e dos efeitos que estas bolhas têm no escoamento. Na figura 4.3a está presente a evolução da velocidade longitudinal média positiva adimensionalizada pela velocidade longitudinal teórica (caso não existissem as bolhas). Ou seja, é a velocidade longitudinal média nas partes de cada secção transversal não ocupadas pela bolha. Depois da entrada do divergente a velocidade do escoamento aumenta muito ao longo deste, atingindo valores duas vezes superiores aos teóricos. Este resultado não seria o esperado, antes pelo contrário. Seria de esperar que com o aumento de área no divergente a velocidade diminuísse. Este resultado só seria possível caso o divergente estivesse ocupado por bolhas com uma dimensão considerável, diminuindo assim bastante a área disponível. A figura 4.3b comprova esta teoria. Como se constata a bolha, em algumas secções do domínio, ocupa aproximadamente metade da secção. Comparando as figuras é possível observar a ligação entre as duas. As duas curvas evoluem de igual forma. Se área da bolha aumenta, diminuindo a área disponível, a velocidade média longitudinal, em relação à velocidade que se teria se não existissem bolhas, também aumenta. Onde a curva da área da bolha é maior, sendo área disponível em relação à secção transversal menor, também a velocidade é maior. Quando a curva da percentagem da área da bolha atinge o seu pico, também a curva da velocidade atinge o seu pico. Com a diminuição da dimensão das bolhas, há um aumento da área disponível resultando na diminuição da velocidade.

A figura 4.4 permite observar de forma mais clara o resultado referido anteriormente do efeito que a dimensão da bolha tem na velocidade longitudinal. Observa-se que ao longo do divergente a velocidade aumenta, quando devia acontecer o oposto. Porém, este facto é explicado uma vez que se constata que ao longo do divergente a área da bolha em relação à área da secção também aumenta. Depois da saída do divergente ($x/L=1$) à medida que a bolha diminui, a velocidade diminui aproximando-se do valor teórico.

A evolução da pressão estática presente na figura 4.5 não seria a esperada, uma vez que a pressão estática, aquando da entrada do escoamento no divergente, diminui. O resultado esperado seria que devido ao aumento de área ao longo do divergente a pressão aumentasse, diminuindo depois ao longo do troço a jusante do divergente.

Contudo, tendo em conta a figura 4.4 percebe-se o motivo para a curva evoluir desta forma. A partir da entrada do divergente, com o aumento do volume das bolhas ao longo deste, o que acontece na realidade é que há uma diminuição da área disponível, apesar do aumento de área da secção transversal do divergente. Assim, ao haver de facto uma

diminuição da área consequentemente há uma diminuição da pressão. A partir do momento em que as bolhas vão diminuindo de volume, fazendo com que a área disponível aumente, a pressão, consequentemente, também aumenta convergindo para o valor da pressão atmosférica na saída.

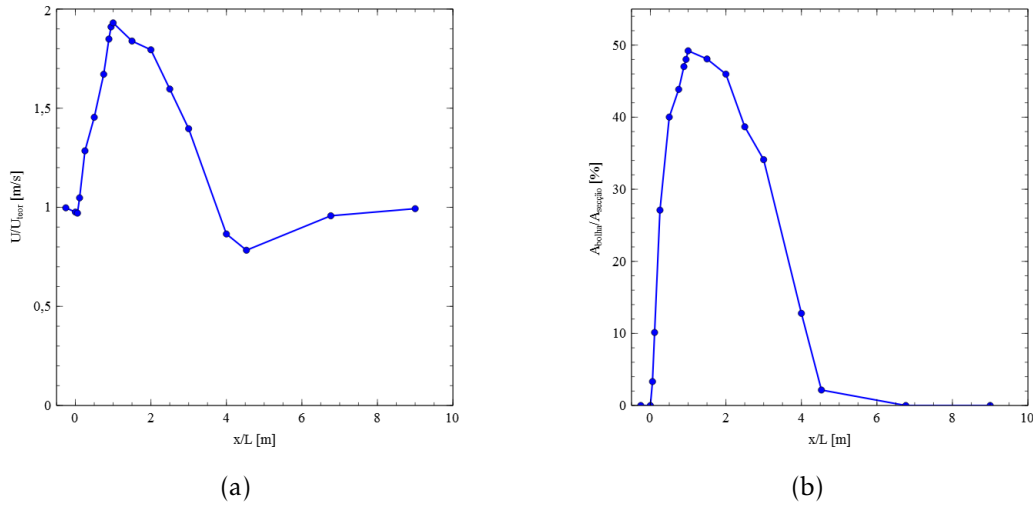


Figura 4.3: Evolução (a) da velocidade longitudinal média na área não ocupada pela bolha de recirculação adimensionalizada pela velocidade teórica e (b) área da secção ocupada pela bolha de recirculação ao longo do domínio.

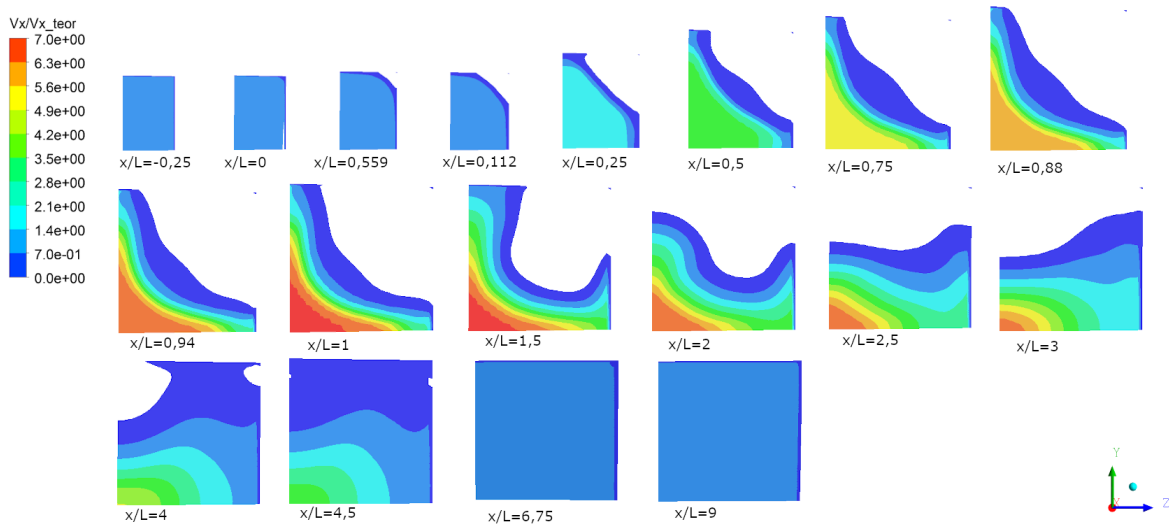


Figura 4.4: Velocidade longitudinal adimensionalizada pela velocidade teórica ao longo do domínio, apenas para a área disponível.

Contudo, há outro resultado inesperado, tendo em conta a curva da evolução da pressão estática ao longo de uma conduta de secção constante. Apesar de se conseguir justificar a evolução da curva, o facto da pressão estática apresentar valores negativos que convergem para zero era algo que não se esperava. Tendo em conta o escoamento numa conduta, seria de esperar que a pressão apresentasse valores positivos que diminuíssem para zero

com o aproximar da saída. Pelo menos, no troço a jusante do divergente a pressão deveria apresentar valores positivos que depois diminuíssem para zero na saída, algo que não acontece.

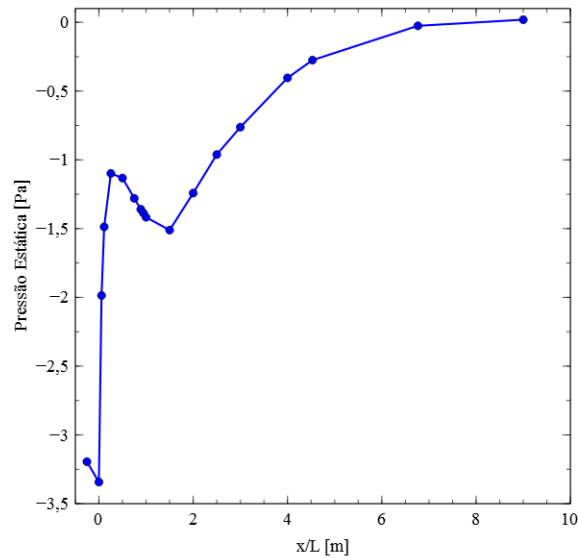


Figura 4.5: Evolução da pressão estática ao longo do domínio

As análises das linhas de corrente, do parâmetro alpha, da vorticidade, bem como da uniformidade do escoamento após a saída do divergente ajudarão a perceber melhor as causas que impedem que a pressão apresente os valores esperados.

Através das linhas de corrente (figura 4.6) constata-se que após a saída do escoamento do difusor há a formação de vórtices no troço a jusante. Contudo, a secção de saída já apresenta um padrão semelhante ao de um escoamento numa conduta retangular de secção constante.

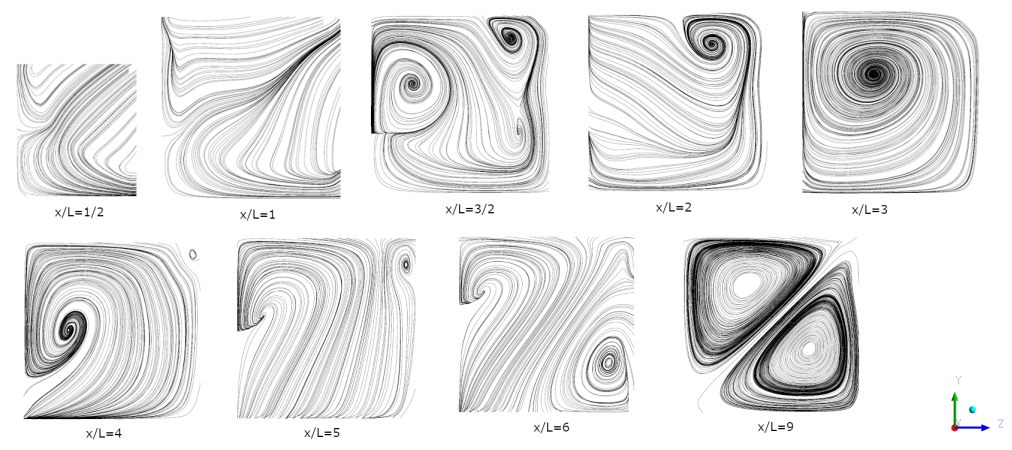


Figura 4.6: Linhas de corrente ao longo de secções do domínio.

4.4.1 Avaliação do parâmetro α

Este parâmetro, que nesta dissertação foi denominado por α , é a razão entre a componente tangencial da velocidade e a velocidade axial média, representando a magnitude da velocidade dos escoamentos secundários. Ally et al (1978) verificaram que para uma conduta em a secção transversal é um triângulo equilátero a magnitude máxima destas velocidades secundárias é, aproximadamente, 1,5% da velocidade axial média. Speziale et al. (1982) mencionou valores de aproximadamente 1% para condutas não circulares.

De modo a confirmar a informação mencionada anteriormente para servir como base de comparação para o caso de estudo, realizou-se a simulação de um escoamento numa conduta longa de secção constante, tendo-se obtido o contorno do parâmetro α presente na figura 4.7.

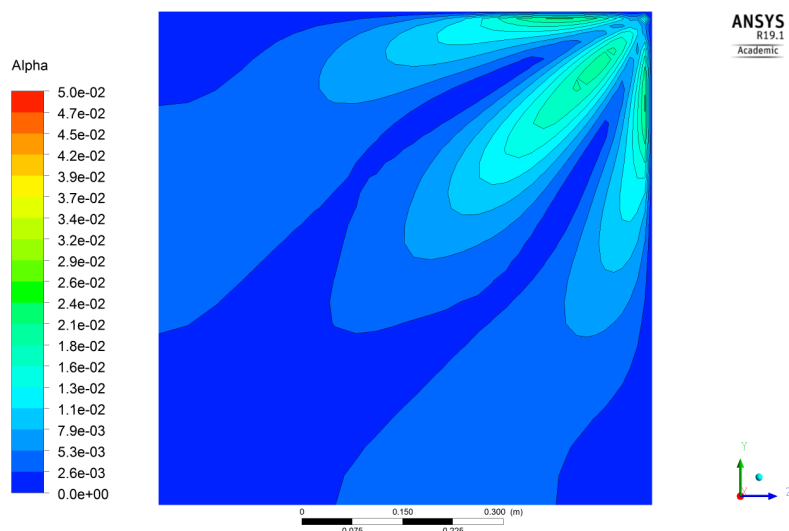


Figura 4.7: Contorno do parâmetro α para uma conduta de secção constante.

O resultado mostra que os valores se aproximam bastante dos valores acima mencionados, sendo a magnitude máxima das velocidades secundárias, aproximadamente, 2% da velocidade média axial.

Na figura 4.8 está representado o parâmetro α para planos ao longo de parte do domínio. Este parâmetro permite observar que a magnitude das velocidades laterais são superiores a 100% da velocidade axial média, em certas regiões.

Mesmo dentro do divergente o escoamento é bastante perturbado. Porém, tal como já se tinha observado na figura 4.6, é após a saída do divergente que escoamento se torna bastante distorcido, com os valores do parâmetro α a aumentarem bastante.

Com o desenvolvimento do escoamento, ao longo do troço a jusante do divergente, os valores de α diminuem.

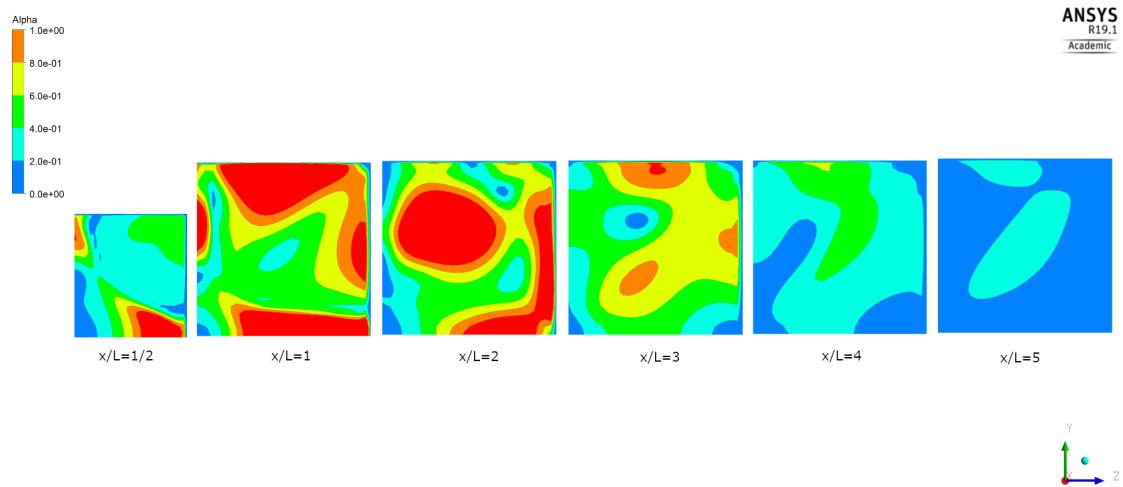


Figura 4.8: Contorno do parâmetro α para planos ao longo do domínio de estudo.

Como se constata na figura 4.9 o contorno do parâmetro α na secção de saída do domínio apresenta valores superiores aos verificados na figura 4.7. A magnitude máxima das velocidade laterais atinge o valor de 5% da magnitude das velocidade média axial.

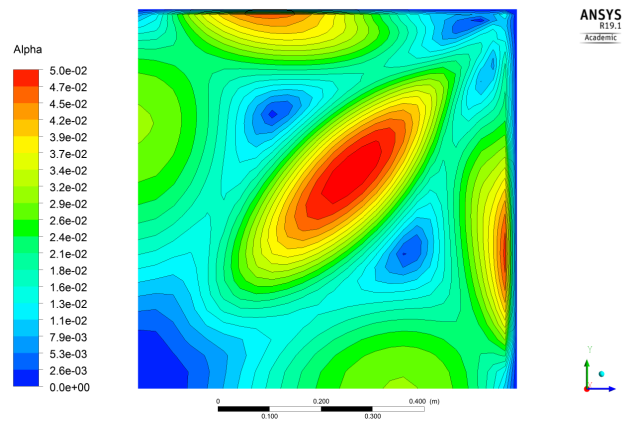


Figura 4.9: Contorno do parâmetro α na secção de saída domínio.

4.4.2 Vorticidade em relação ao eixo longitudinal

Sendo a vorticidade em relação a x , $\frac{\partial V_y}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial y}$, só existe se existirem velocidades laterais e vice-versa. Logo onde a vorticidade em relação a x é zero significa que estas velocidades laterais não existem. A figura 4.10a demonstra o padrão da vorticidade para um escoamento completamente desenvolvido numa conduta de secção constante, onde se consegue identificar dois escoamentos secundários independentes separados pelo bissetor do canto, onde a vorticidade é zero. Na figura 4.10b está representada a vorticidade para a secção de saída do caso de estudo, onde também já se conseguem identificar dois escoamentos secundários independentes. Contudo, constata-se que os valores de vorticidade são mais elevados. No caso de estudo como os valores de vorticidade são superiores significa que

também os valores das velocidades laterais são superiores, tendo efeitos, como se pode observar, nas linhas de corrente.

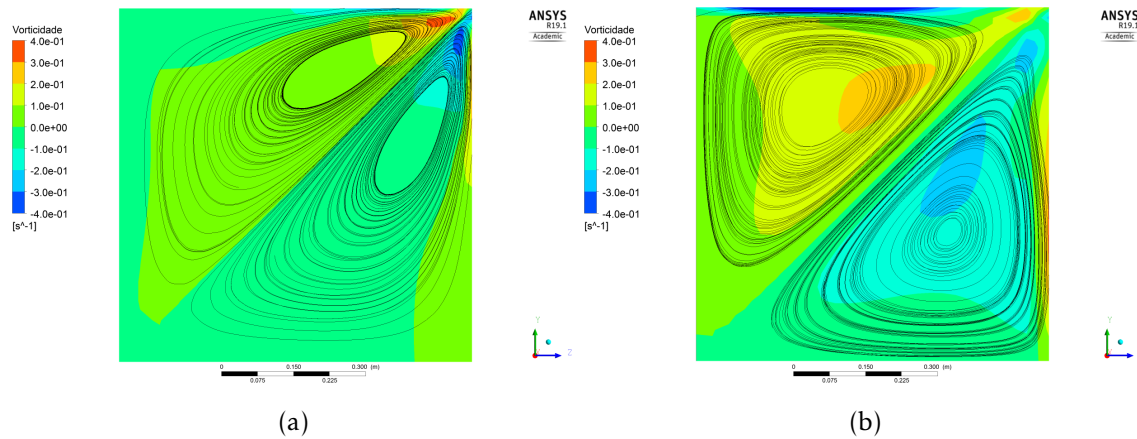


Figura 4.10: Campo de Vorticidade e linhas de corrente na secção de saída (a) da conduta longa de secção constante e (b) do caso de estudo.

4.4.3 Uniformidade do escoamento no troço a jusante do divergente

De forma a avaliar-se a uniformidade da velocidade longitudinal na secção de saída do domínio, utilizou-se, novamente, como referência o caso de uma conduta longa de secção constante (figura 4.11a).

Observando agora o contorno de V_x para a secção de saída do caso de estudo (figura 4.11b), constata-se que não só apresenta um padrão diferente da figura 4.11a, ou seja, um pouco distorcido, como também apresenta valores inferiores. Contudo, tendo em conta os valores verificados para o parâmetro α na secção de saída, que mostraram que as velocidades laterais são superiores relativamente ao caso da conduta de secção constante, é de esperar que consequentemente a componente longitudinal da velocidade seja inferior.

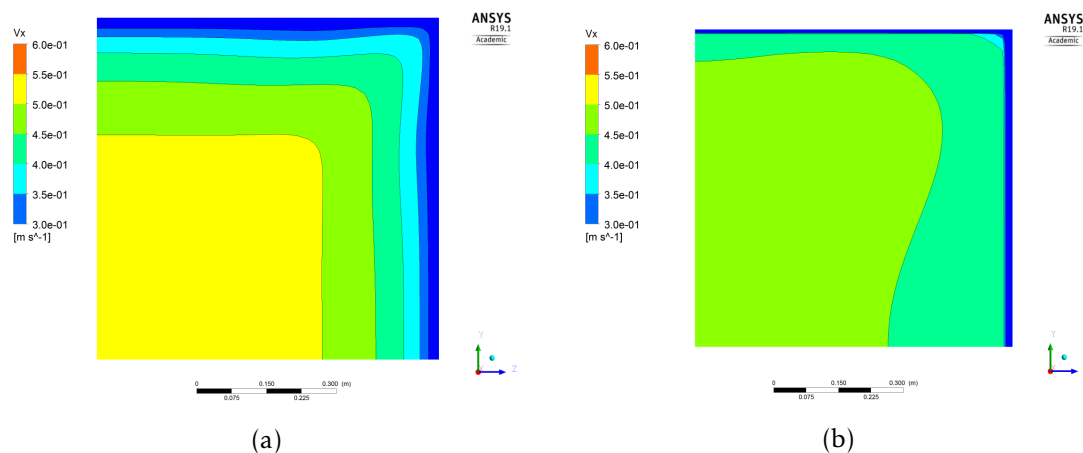


Figura 4.11: Contorno da velocidade longitudinal na secção de saída(a) da conduta longa e (b) do caso de estudo .

4.4.4 Aumento do comprimento do troço a jusante

Devido aos resultados verificados para o parâmetro α , para a vorticidade e para a uniformidade de V_x na secção de saída do domínio conclui-se que mesmo após o fecho da bolha de recirculação, o escoamento ainda não se encontra completamente desenvolvido. Deste modo, realizou-se uma simulação em que se aumentou o comprimento do troço a jusante para o dobro de modo a permitir o desenvolvimento por completo do escoamento e, conseqüentemente, verificar se o facto da pressão estática não recuperar para valores positivos possa estar relacionado.

Observando a curva da pressão estática (figura 4.12a) constata-se que os valores negativos de pressão estática continuam a existir, uma vez que a bolha de recirculação continua existir e o escoamento até conseguir recuperar encontra-se bastante torcido. Contudo o aumento do domínio permitiu que a pressão estática recuperasse para valores positivos diminuindo depois para 0 Pa (figura 4.12b).

Por outro lado, com o desenvolvimento completo do escoamento verificou-se outro resultado a salientar. Com o escoamento a passar a ter espaço para deixar de estar tão torcido após o fecho da bolha, verificou-se que houve conseqüências relativamente à dimensão da bolha de recirculação. Como se verifica na figura 4.13 o aumento do domínio permitiu uma redução na área da bolha em certas secções.

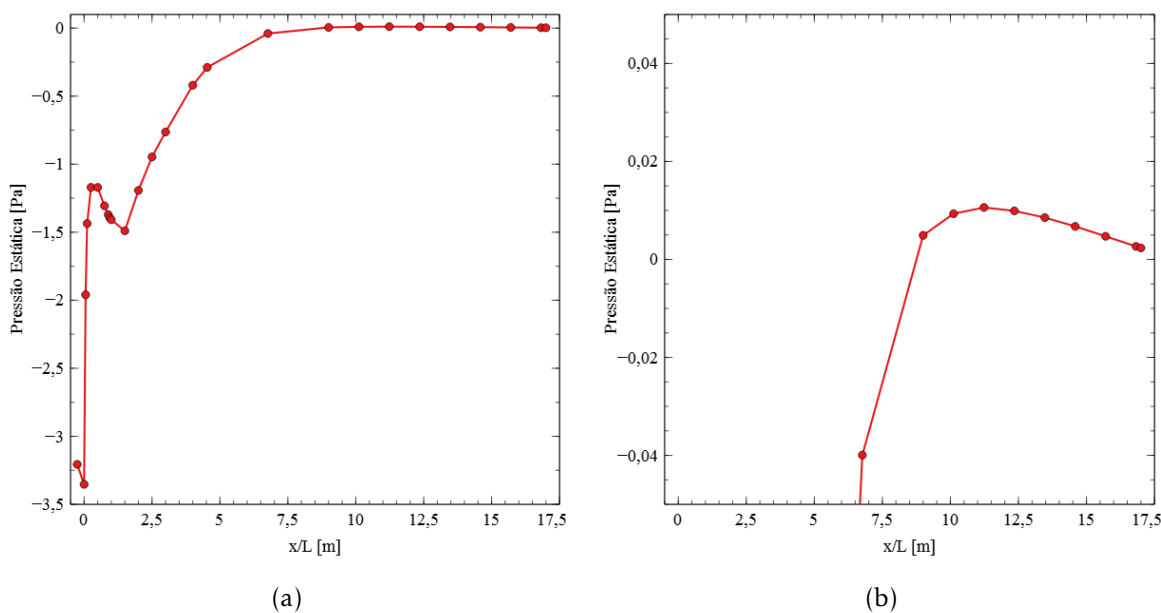


Figura 4.12: (a) Evolução da pressão estática ao longo do domínio aumentado e (b) por menor da evolução da pressão estática nas regiões próximas da saída.

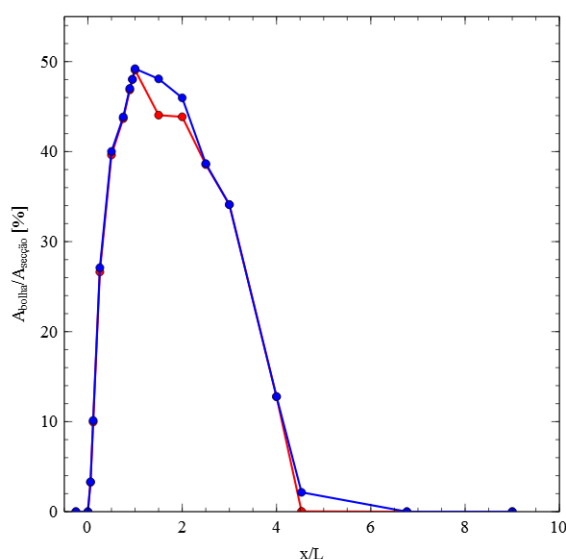


Figura 4.13: Comparação da evolução da área da bolha entre o caso de estudo — e o caso do domínio aumentado —.

4.5 Casos com rede

Na UDF da queda de pressão os valores do coeficiente de queda de pressão testados foram 0.8, 1.5 e 3.0, tendo em conta a gama de valores aconselhados a utilizar na literatura do Capítulo 2. Nas UDFs da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação turbulenta, os valores dos fatores multiplicativos impostos foram 1,2 e 1,3145, respetivamente, e mantidos para as três redes de modo a que as diferenças encontradas entre casos pudessem ser atribuídas apenas à variação do valor do coeficiente.

4.5.1 Validação das UDFs

De forma a validar a queda de pressão estática imposta pela UDF, na figura 4.14 estão representadas as curvas da pressão estática ao longo do domínio para o caso sem rede e para os casos com rede. Os resultados observados não são os esperados à partida. O resultado pretendido seria que a UDF impusesse uma queda de pressão, em que a montante da rede a pressão aumentasse e a jusante diminuísse. De facto a pressão aumenta a montante, contudo também aumenta a jusante relativamente ao caso sem rede. Ou seja, a pressão estática aumenta ao longo do domínio, sendo o aumento maior quanto maior o coeficiente de queda de pressão utilizado. Na secção imediatamente a montante da rede e na secção imediatamente a jusante da rede, os valores da pressão são praticamente iguais. Apesar destes resultados não serem os que se pretendiam, não significa que a UDF seja inválida. Tendo em conta não só os resultados obtidos para o caso sem rede em que se verificou a existência de uma bolha de recirculação de grandes dimensões, bem como os efeitos da rede nesta mesma bolha, não se pode considerar que a UDF seja inválida. Os dois

factos mencionados anteriormente têm influência na área disponível, que por sua vez, tem influência na pressão.

A figura 4.15 representa a evolução da energia cinética turbulenta ao longo da linha central da conduta. A evolução da energia cinética turbulenta para os casos das redes evolui de acordo com o esperado, tendo em conta os resultados presentes no Capítulo 2 para a intensidade turbulenta nas regiões próximas da rede. Fazendo a comparação com a figura 2.1, constata-se que os níveis de turbulência ao se aproximarem da rede diminuem. Na rede esses níveis aumentam mas acabam por diminuir para níveis inferiores ao caso sem rede.

Na figura 4.15 também é possível observar uma grande aumento da energia cinética turbulenta. Uma vez que a energia cinética turbulenta corresponde à energia cinética por unidade de massa presente nos vórtices e quanto maior for, maior é o tamanho desses vórtices, indicando uma possível zona de recirculação.

Apresentam-se agora na figura 4.15 a evolução de V_x para o modelo de turbulência RSM. Os resultados da evolução de V_x para os restantes modelos simulados são apresentados nos apêndices, podendo-se observar novamente que as diferenças verificadas de caso para caso, não justificam a apresentação de resultados para os três modelos.

Com a introdução da rede há uma diminuição das regiões onde V_x é negativa, significando uma diminuição da zona de recirculação, principalmente a jusante da rede.

À medida que o coeficiente de queda de pressão aumenta maior é a redução da bolha de recirculação.

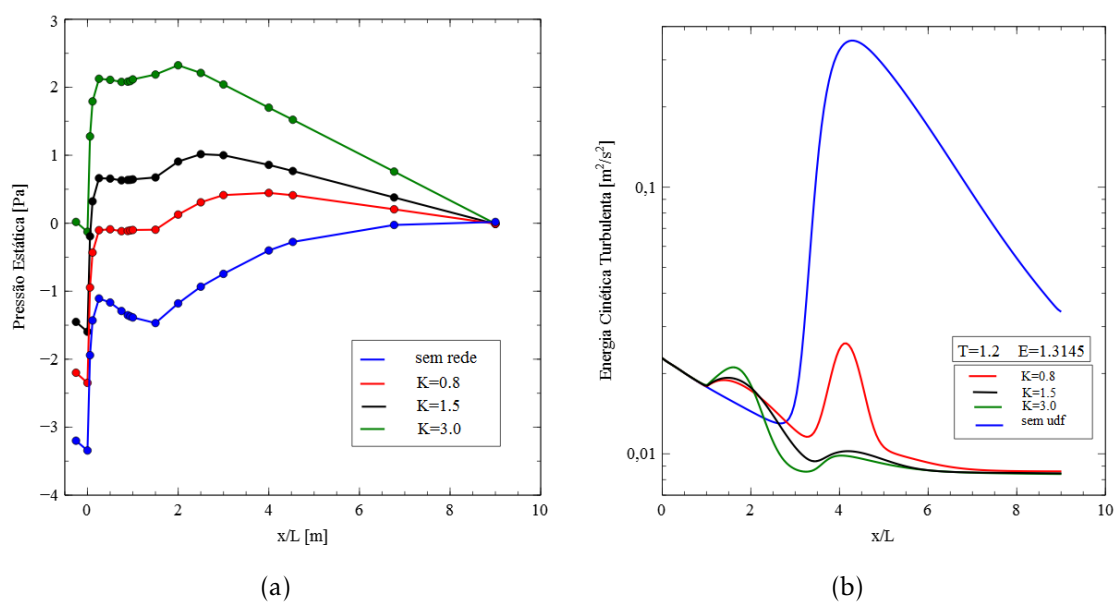


Figura 4.14: Evoluções (a) da pressão estática e (b) da energia cinética turbulenta ao longo do domínio.

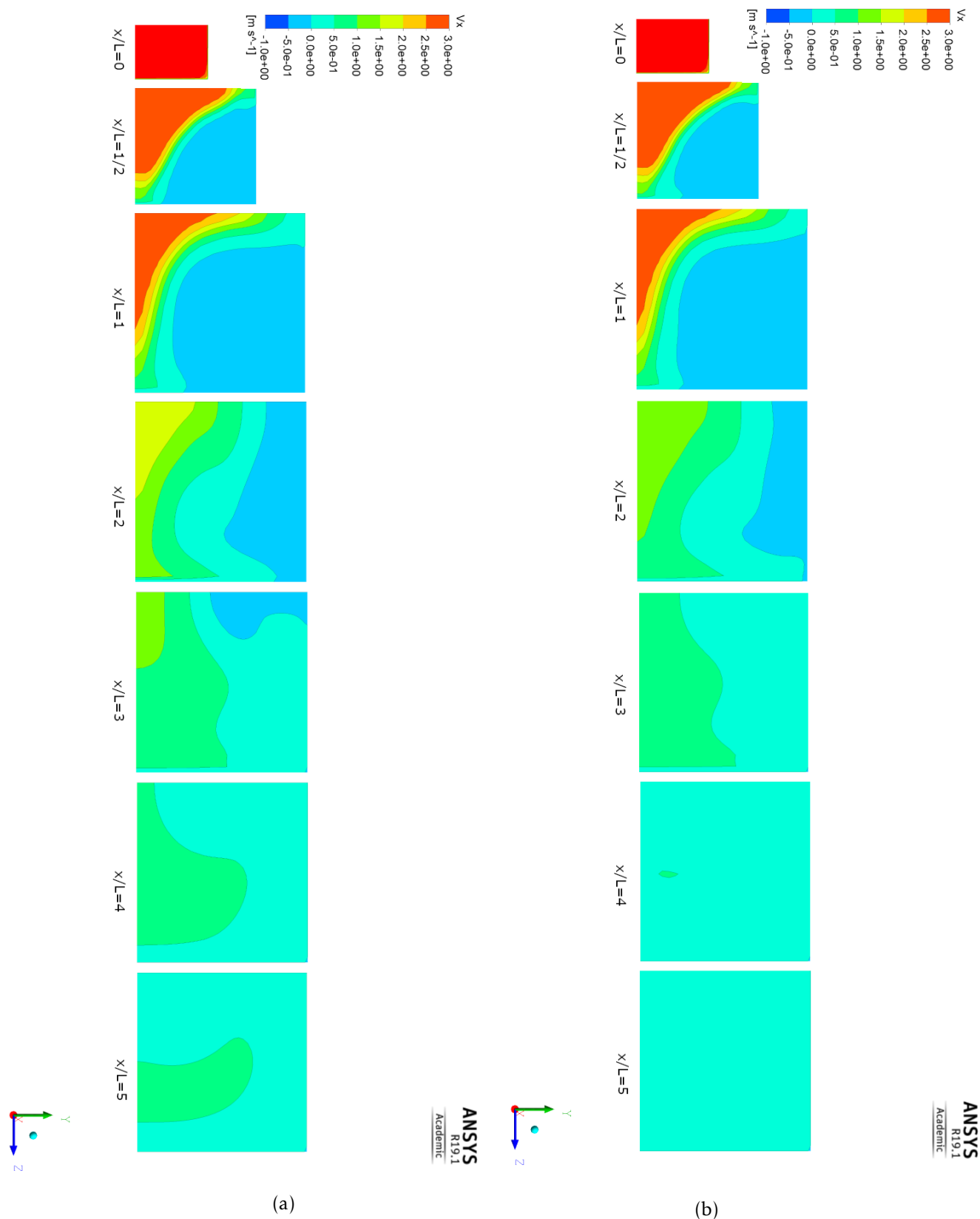
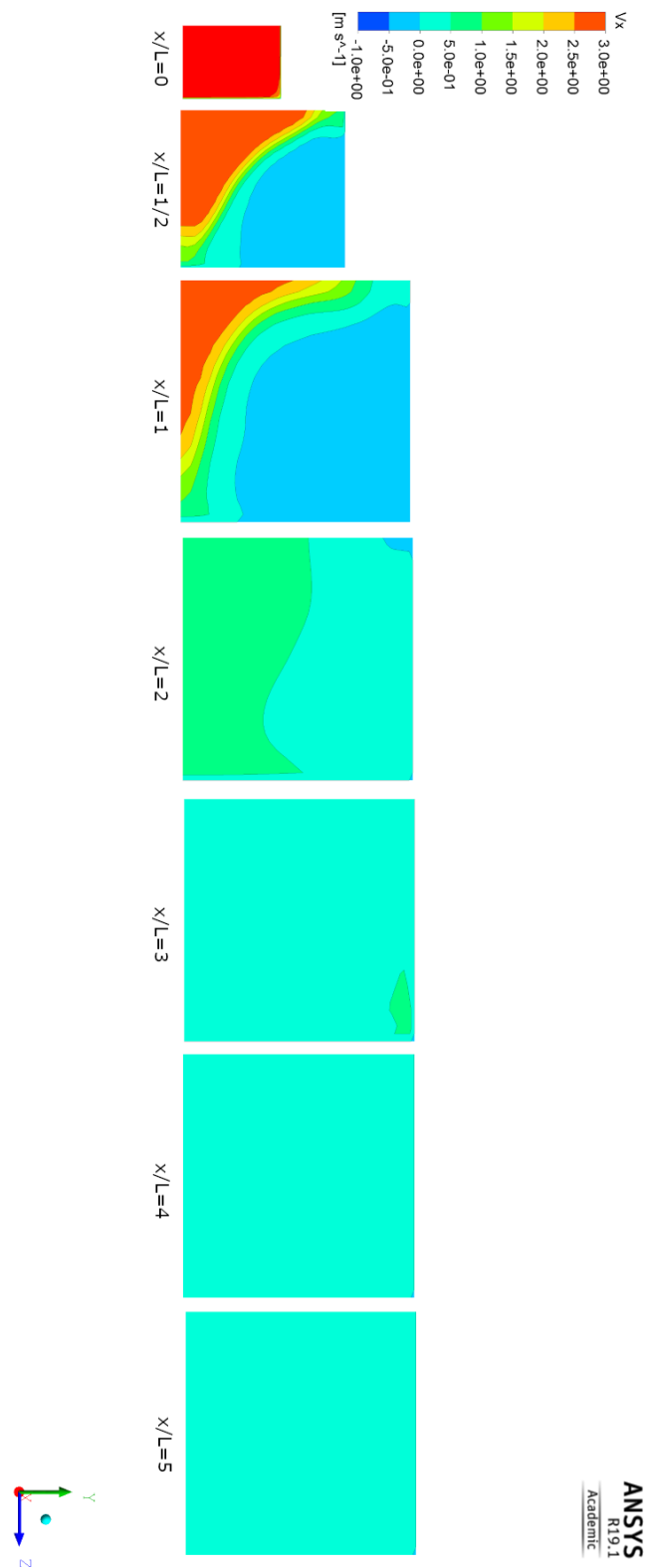


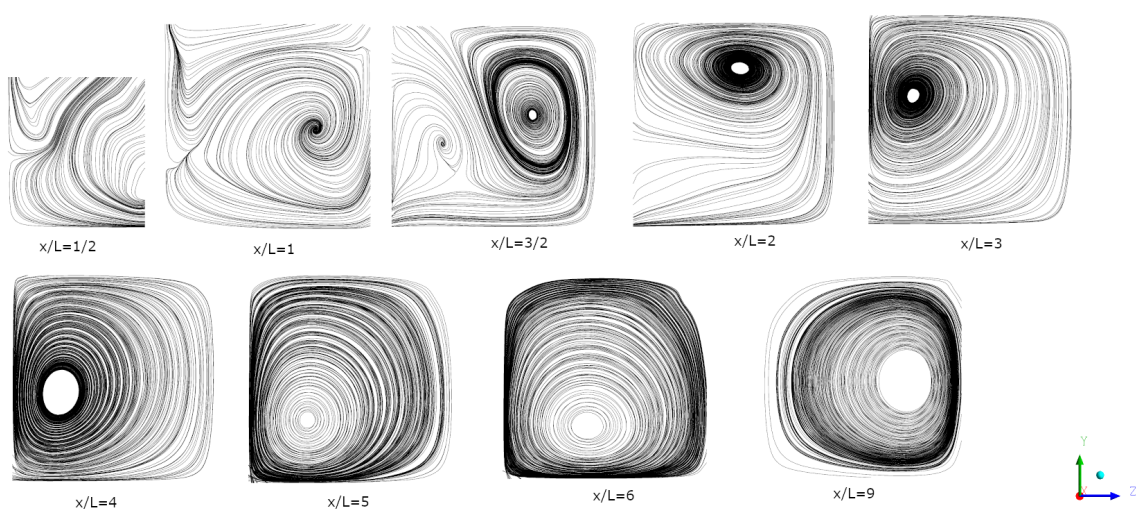
Figura 4.15: Evolução da velocidade longitudinal para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continua).



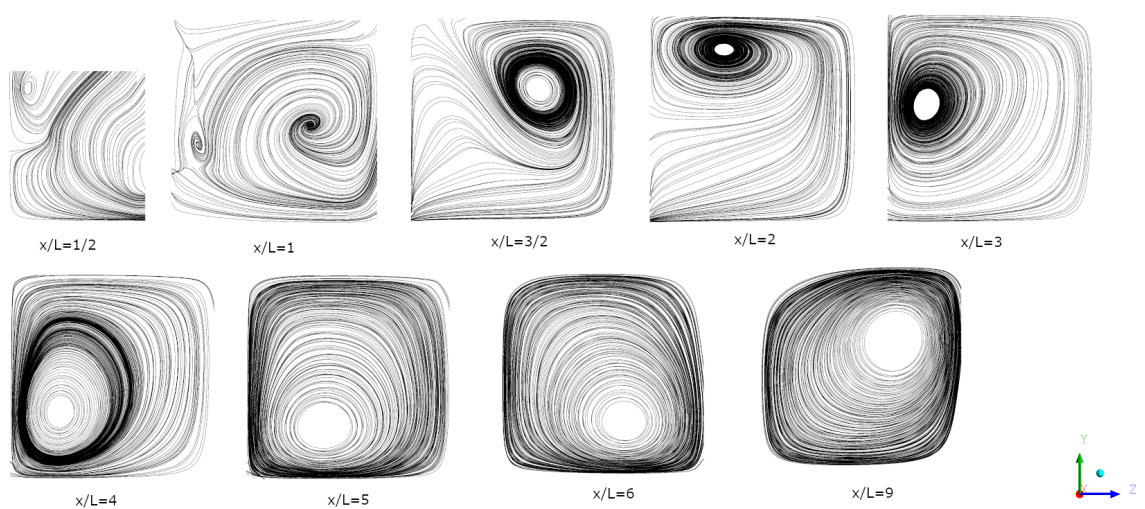
(c)

Figura 4.15: Evolução da velocidade longitudinal para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continuação).

De forma a poder observar-se os efeitos que a rede produz no escoamento, estão representadas na figura 4.16 as linhas de corrente para as três redes. O escoamento ao atravessar a rede ($x/L=1$) torna-se bastante torcido. Este resultado já era esperado não só pelo facto de existir a bolha de recirculação, como também com a passagem do escoamento pela rede há a formação de vórtices. Contudo seria de esperar que depois do fecho da bolha o escoamento se conseguisse desenvolver, deixando de estar tão torcido, e apresentasse um padrão próximo da figura 2.5b. Como se constata, mesmo na secção de saída, o escoamento ainda se encontra bastante torcido.



(a)



(b)

Figura 4.16: Linhas de corrente ao longo de secções do domínio para os casos (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$ (continua).

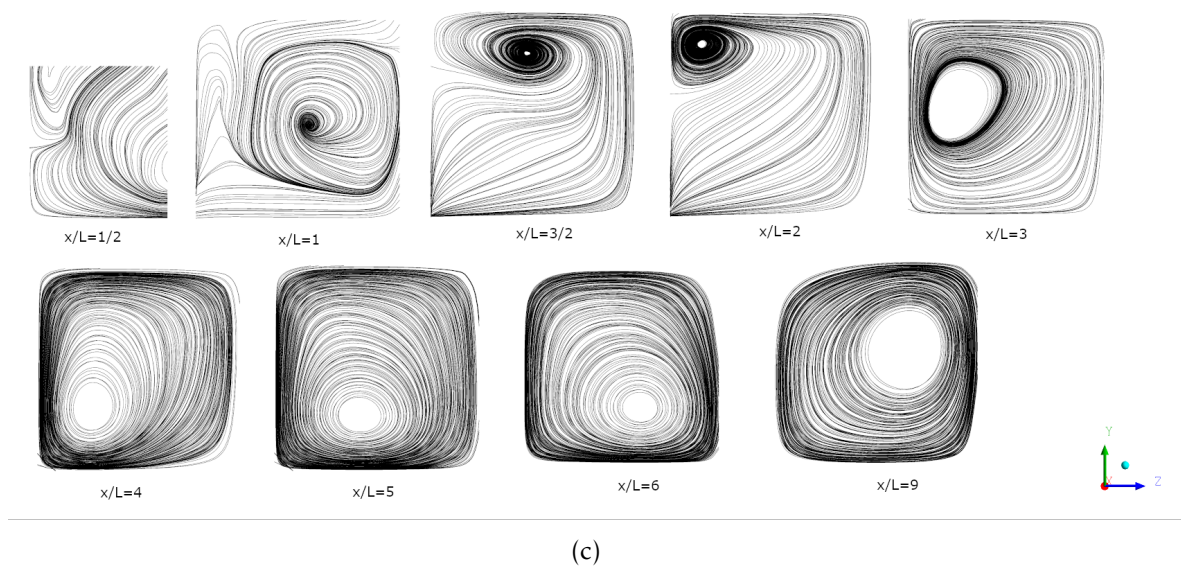


Figura 4.16: Linhas de corrente ao longo de secções do domínio para os casos (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$ (continuação).

4.5.2 Aumento do comprimento do troço a jusante

Na figura 4.16 observa-se que, apesar do fecho da bolha de recirculação, o escoamento ainda não teve espaço para se desenvolver, deixando de estar tão torcido. Assim, como o escoamento na secção de saída se encontra bastante mais torcido comparativamente ao caso sem rede para o mesmo domínio, aumentou-se o troço a jusante para um comprimento superior ao que se tinha aumentado anteriormente, tendo agora um comprimento de $24L$.

A figura 4.18 demonstra as linhas de corrente para as memsmas secções da figura 4.17 mas agora para o domínio aumentado.

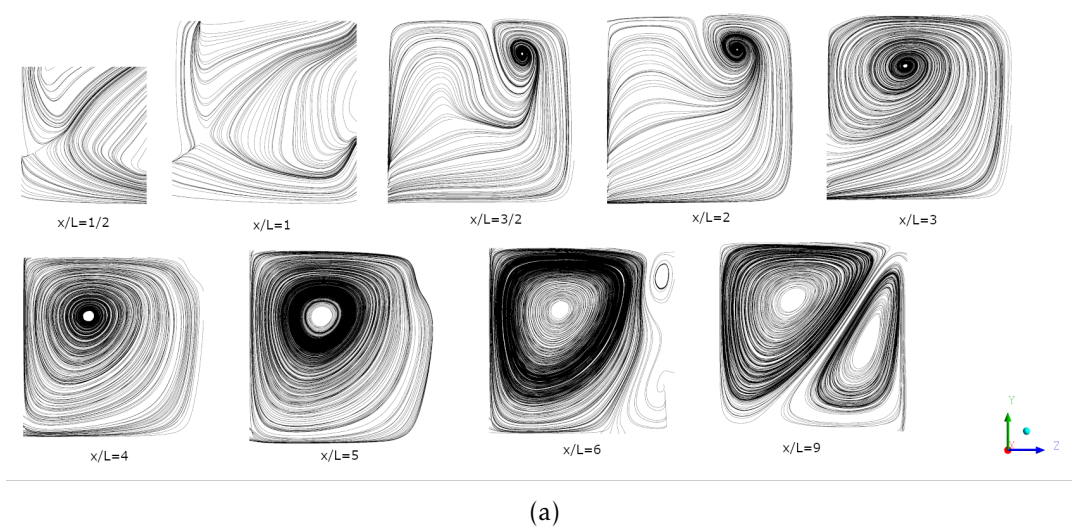
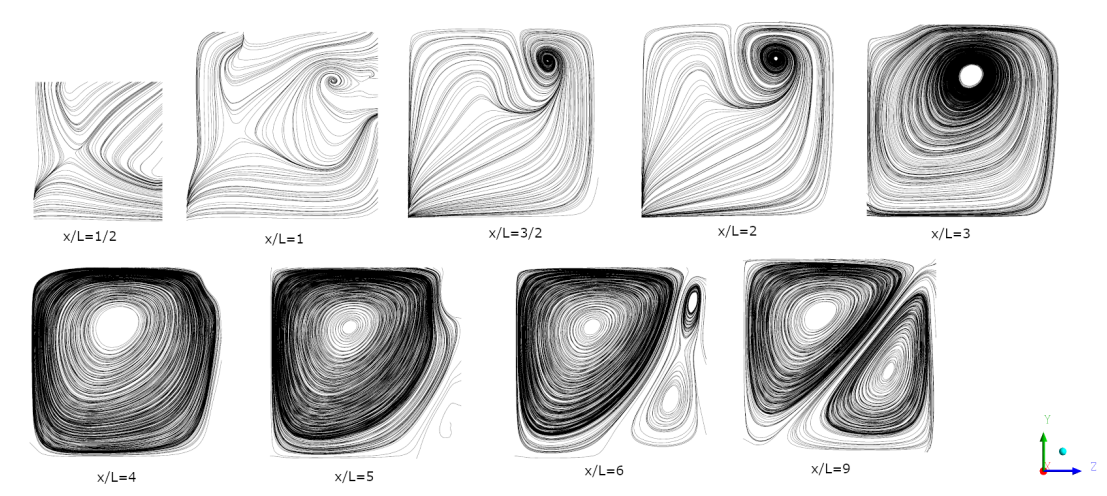
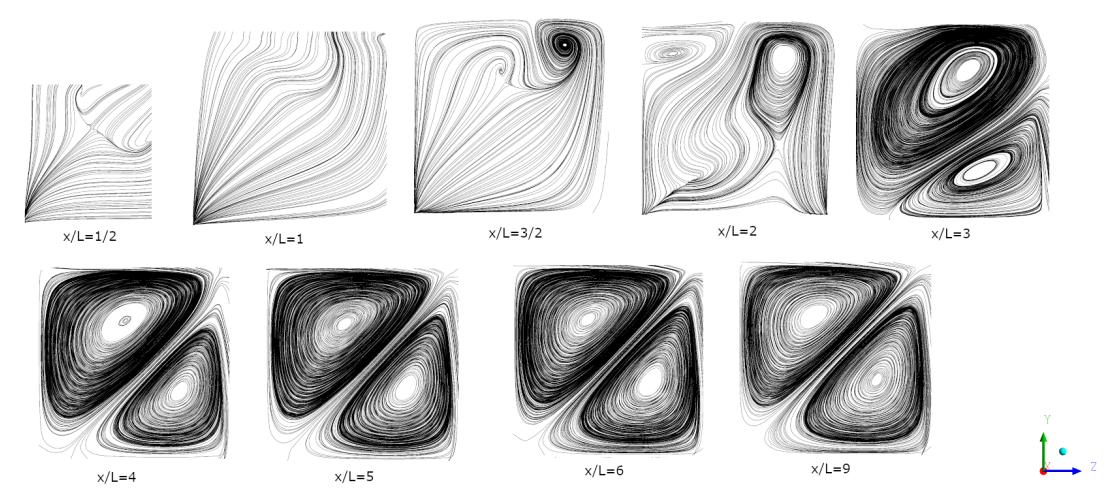


Figura 4.17: Linhas de corrente ao longo de secções do domínio aumentado para os casos (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$ (continua).



(b)



(c)

Figura 4.17: Linhas de corrente ao longo de secções do domínio aumentado para os casos(a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continuação).

Como se constata o aumento do domínio permitiu o desenvolvimento do escoamento. É de salientar o facto das redes com $K=0.8$ e $K=1.5$ tornarem o escoamento a jusante mais torcido do que o caso sem rede. Já o caso de $K=3$ torna o escoamento menos torcido. Contudo nos três casos o escoamento acaba por recuperar e desenvolver-se por completo.

Tal como se tinha verificado para o caso sem rede também a figura 4.18 comprova uma diminuição da bolha de recirculação. Com o aumento do domínio houve uma diminuição da área da bolha como também o seu fecho ocorre mais cedo.

Comparando agora a evolução da bolha para os três casos (figura 4.19) confirma-se o resultado que já se tinha observado para o domínio mais pequeno. O aumento de K permite uma maior diminuição da bolha. Também se verifica que um coeficiente de queda

de pressão mais elevado permite que a bolha feche mais cedo. Se se observar as linhas de corrente verifica-se que a bolha ao fechar mais cedo, consequentemente, o escoamento deixa de estar tão torcido mais cedo. Outro resultado que se retira é que o efeito dissipador da rede em relação à bolha é maior a jusante da rede.

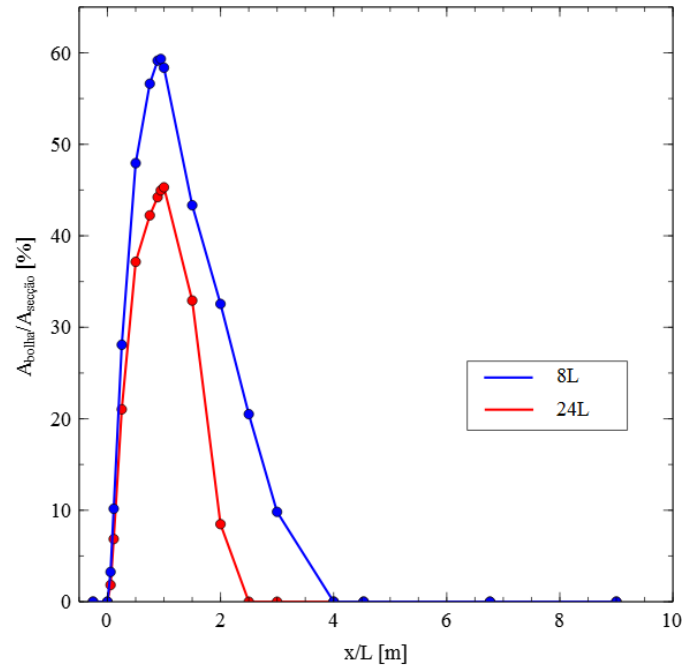


Figura 4.18: Evolução da área da bolha de recirculação para a rede com $K=0.8$.

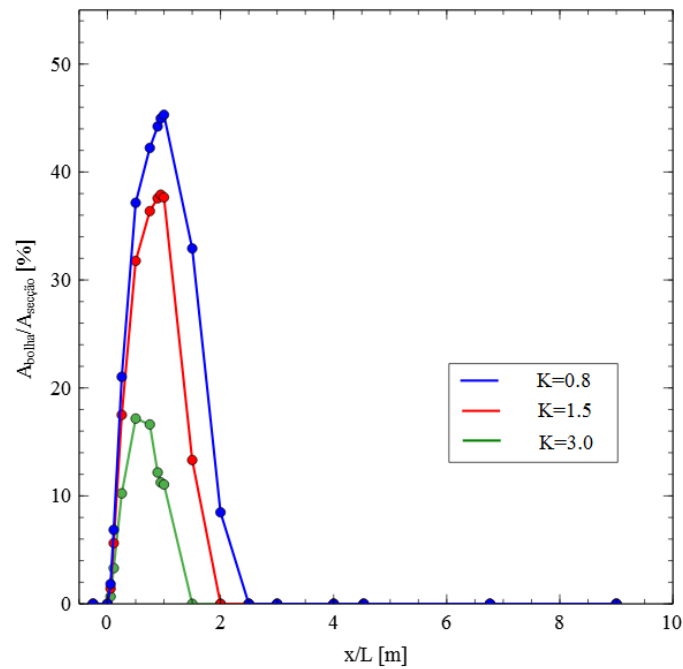


Figura 4.19: Evolução da área da bolha de recirculação para as três redes.

Para além dos efeitos na bolha, o aumento do domínio também teve efeitos na pressão (figura 4.20), deixando de se verificar valores negativos de pressão. Relativamente à validação da UDF da queda pressão, analisando os gráficos e tendo agora uma ideia mais concreta do escoamento pode-se considerar a UDF válida. Reparando nas pressões na secção imediatamente antes e imediatamente depois da rede pode-se considerar que as pressões são praticamente iguais. Contudo a secção a montante situa-se dentro do divergente e a secção a jusante situa-se na conduta de secção constante. Logo, a secção a montante possui uma área inferior à secção a jusante. Se adicionar o facto da bolha fazer com que a área disponível relativamente às respectivas secções, seja inferior a montante, a diferença de áreas aumenta. Desta forma a pressão a montante deveria ser inferior à pressão a jusante. O facto de ser aproximadamente constante, considera-se que se deve à UDF. Na figura 4.21 está presente a evolução do parâmetro α ao longo de secções do domínio, com maior foco nas zonas a jusante da rede. A evolução de α ao longo do troço a jusante corresponde à evolução das linhas de corrente observadas anteriormente. Os valores mais baixos de α são verificados para o caso de $K=3$, uma vez que é para este caso que a bolha de recirculação se revela ser menor e fechar mais cedo, permitindo ao escoamento recuperar e deixar de estar tão torcido também mais cedo.

A fim de perceber os efeitos da rede no escoamento dentro do divergente, estão representadas três secções na figura 4.22, para cada rede. Também se confirma que com o aumento de K , a magnitude das velocidades laterais diminui.

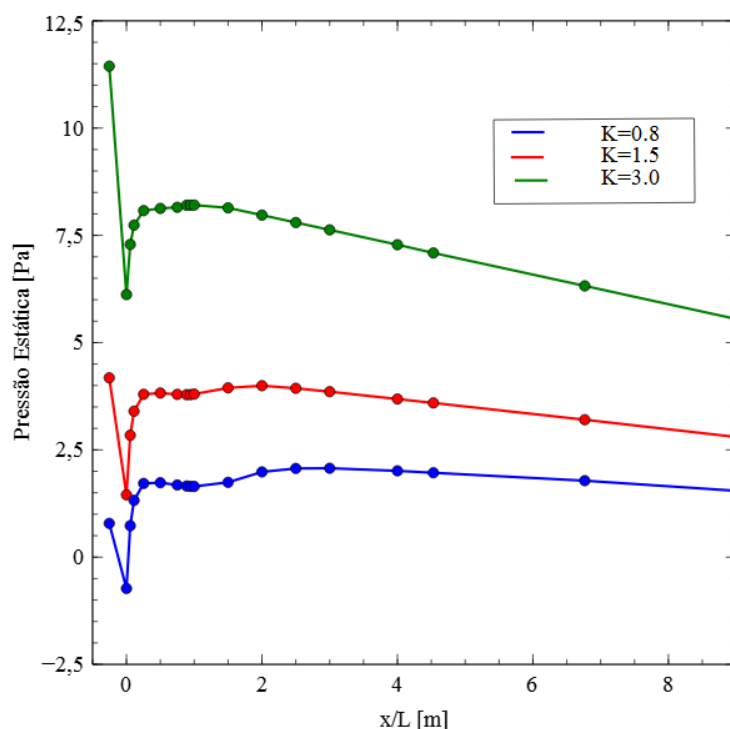


Figura 4.20: Evolução da pressão estática para os casos com rede.

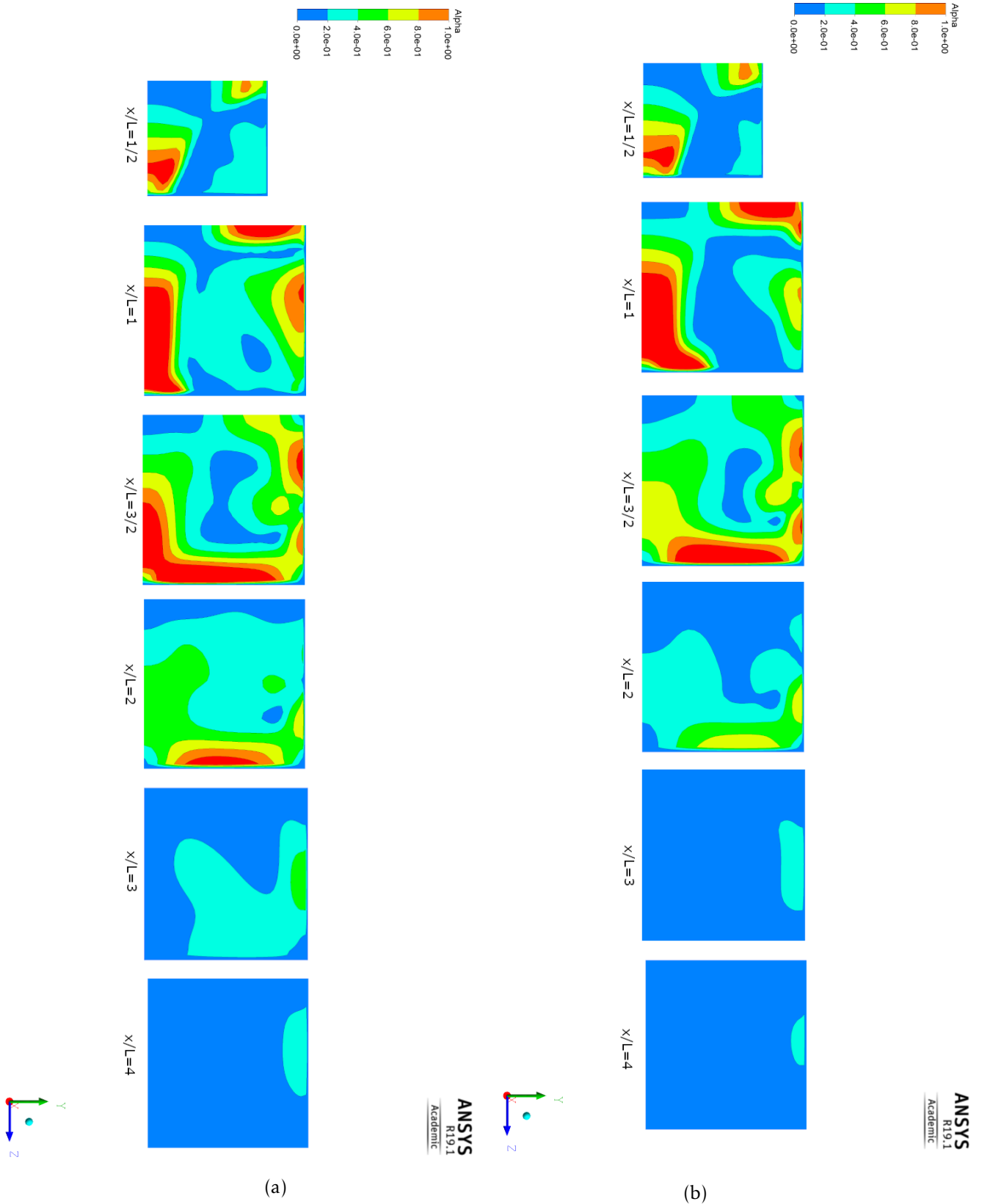
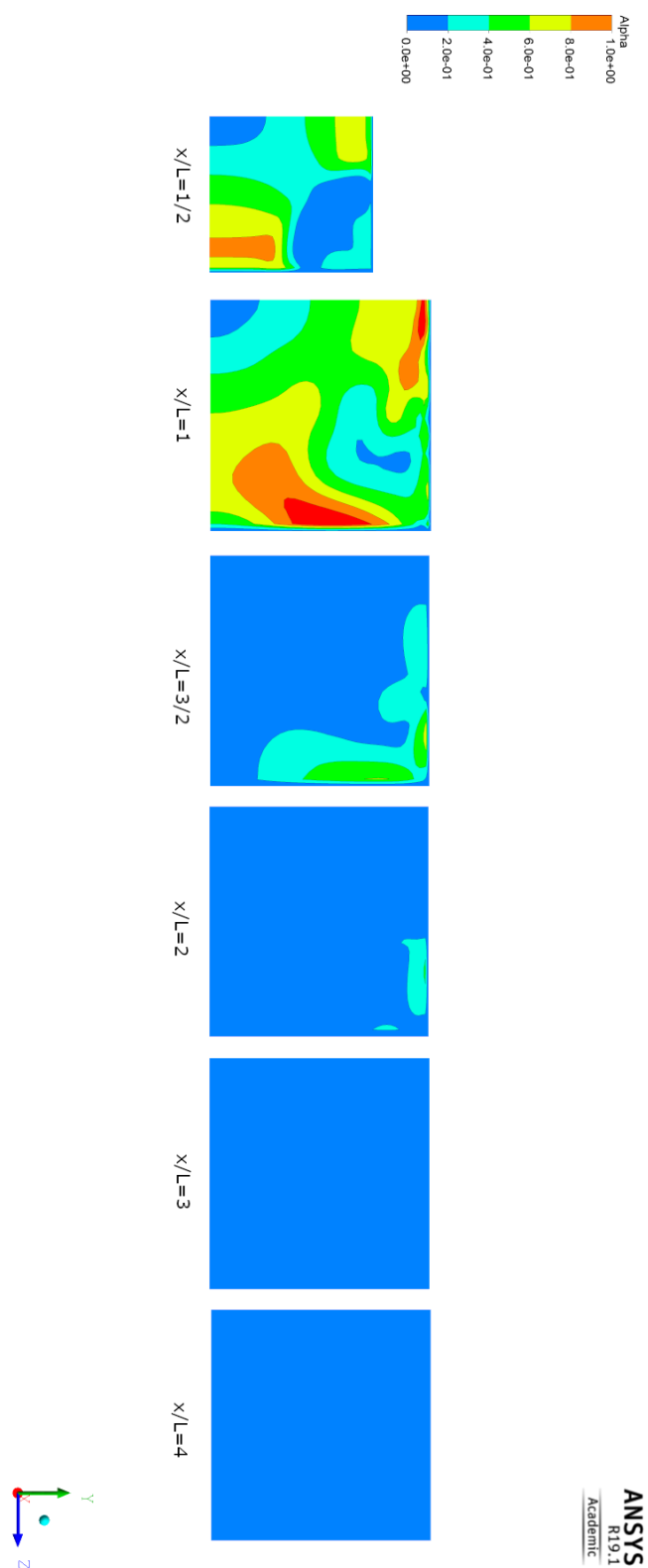


Figura 4.21: Evolução do parâmetro α ao longo de secções do domínio aumentado para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continua).



(c)

Figura 4.21: Evolução do parâmetro α ao longo de secções do domínio aumentado para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continuação).

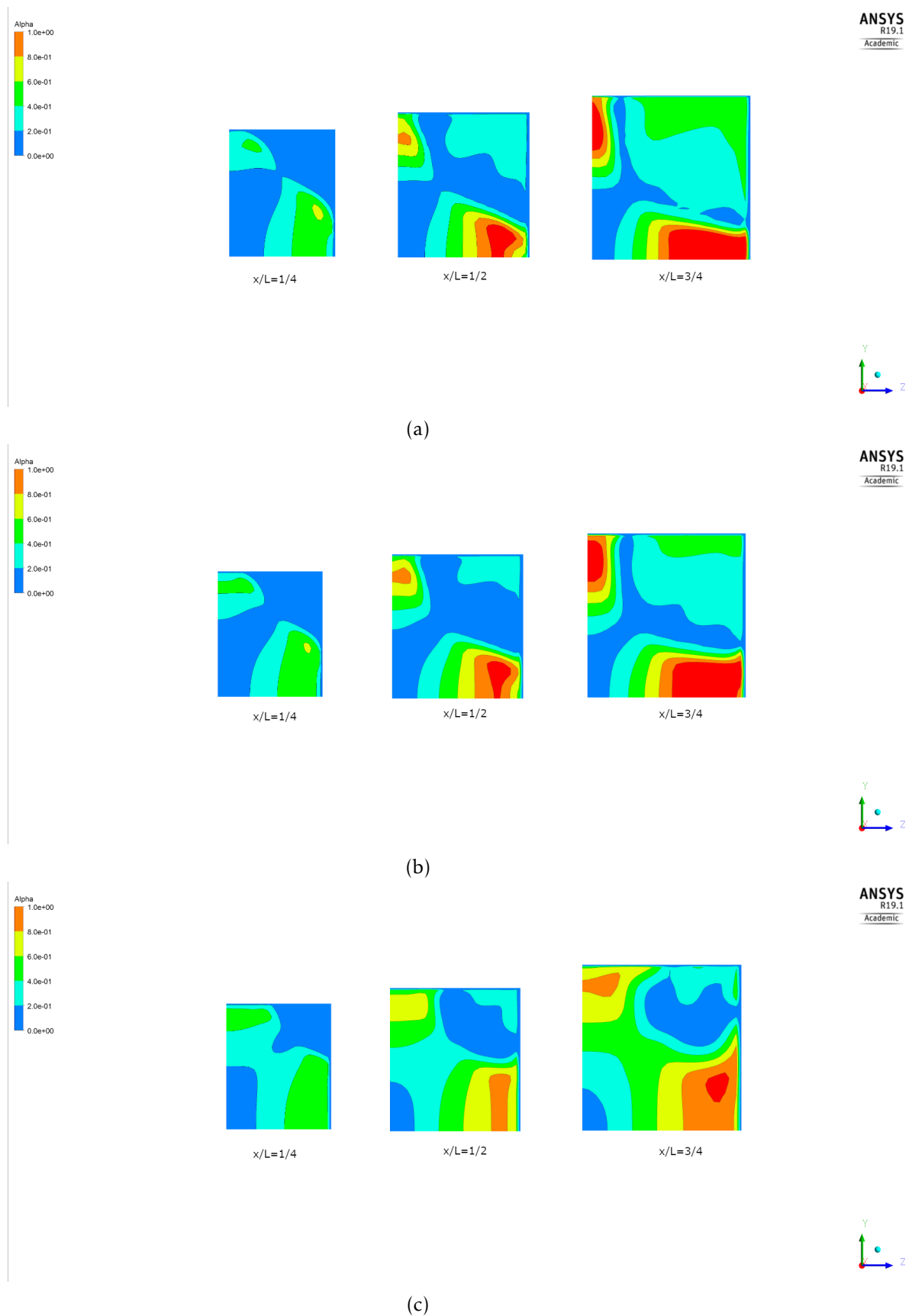


Figura 4.22: Evolução do parâmetro α ao longo de secções do divergente para o modelo RSM onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$.

Como se observa na figura 4.23 os escoamentos na secção de saída apresentam o padrão bastante semelhante ao verificado na figura 4.11a para a secção de saída da conduta de secção constante, significando que o escoamento já se encontra completamente desenvolvido, apesar dos valores da velocidade serem inferiores.

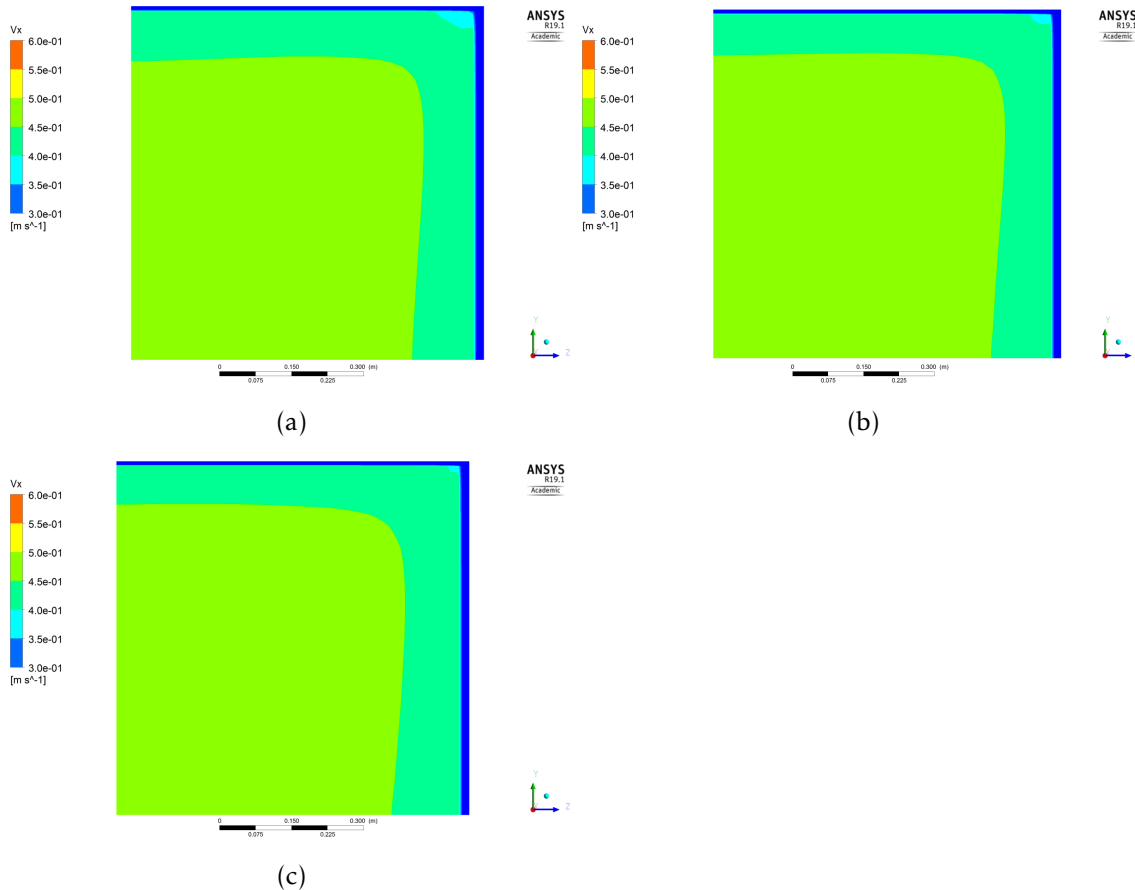


Figura 4.23: Contorno de V_x na secção de saída para os casos (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$.

4.6 Comparação com Caso de Secção Quadrada

De modo a perceber os efeitos causados no escoamento devido ao facto de no divergente em estudo haver uma variação do tipo de secção transversal entre a entrada e a saída, simulou-se o escoamento num divergente em que não houvesse esta variação, mantendo-se uma secção quadrada entre a entrada e a saída.

Com esta comparação assumiu-se que as diferenças encontradas nos resultados deviam-se apenas ao facto de haver variação do tipo de secção transversal no caso em estudo.

Na figura 4.24 é possível observar a evolução da velocidade longitudinal para o caso do divergente de secção quadrada, onde o modelo utilizado foi o RSM. À semelhança do divergente em estudo é visível uma zona de recirculação nas regiões onde V_x é negativa. Contudo comparando com a mesma figura para o caso de estudo, nota-se uma diminuição

das regiões onde V_x é negativa e um aumento de V_x nas regiões onde esta é positiva.

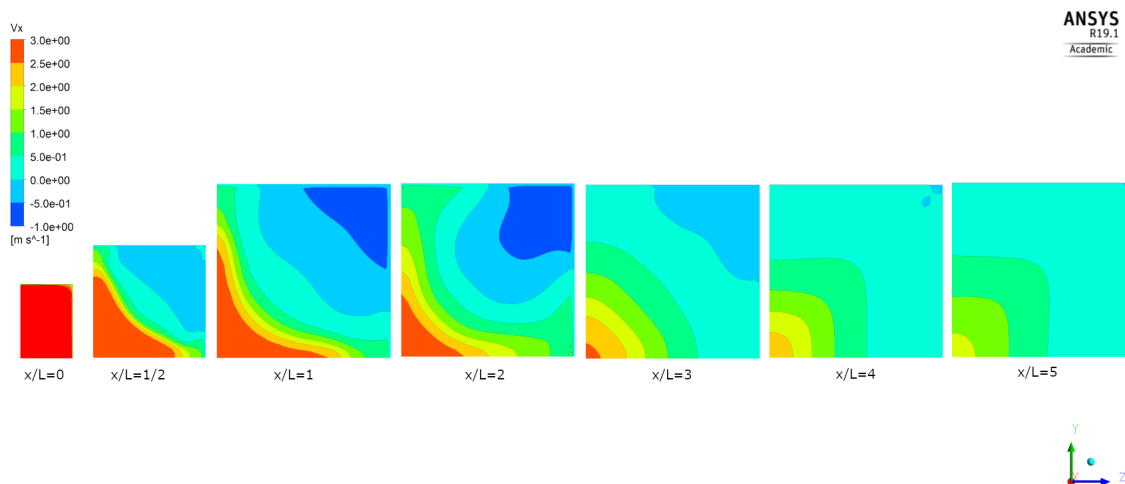


Figura 4.24: Evolução da velocidade longitudinal para o caso em que a secção de entrada do divergente é quadrada.

4.6.0.1 Avaliação do parâmetro α

Na figura 4.25 está representado parâmetro α para os mesmos planos da figura 4.8. Ao fazer a comparação é notório uma grande diminuição deste parâmetro, nomeadamente a jusante da rede, significando uma diminuição da intensidade das velocidades laterais em relação à velocidade axial média.

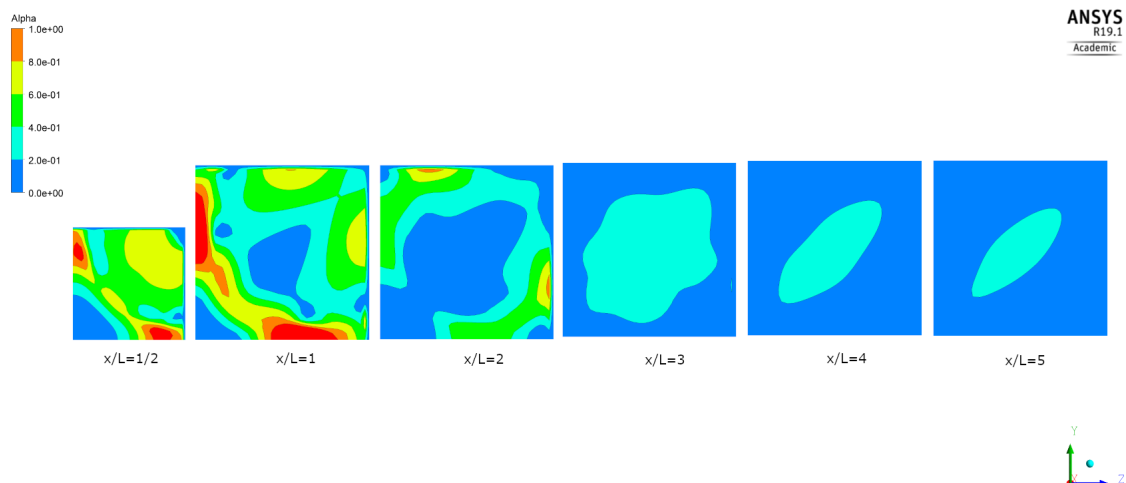


Figura 4.25: Evolução do parâmetro α ao longo do domínio para o caso em que a secção de entrada do divergente é quadrada.

Na secção de saída foi necessário, novamente, recorrer a uma escala de valores superiores aos valores utilizados na escala da figura do caso da conduta longa de secção constante, uma vez que os valores para o parâmetro α na saída são superiores, tal como já se tinha verificado na secção de saída do caso de estudo.

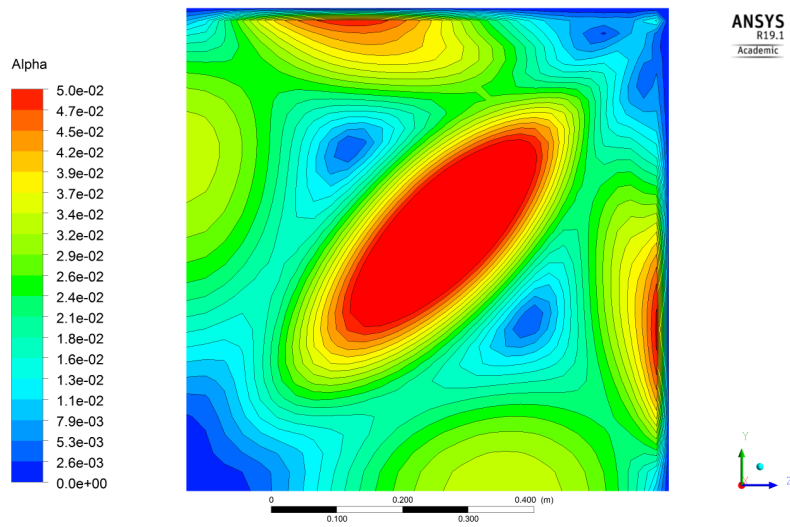


Figura 4.26: Parâmetro α na secção de saída do domínio.

4.6.0.2 Vorticidade a jusante da rede

Relativamente à vorticidade para a secção de saída (figura 4.27) as diferenças nos valores de vorticidade comparativamente com o caso de estudo são poucas, significando que comparativamente ao caso da conduta longa os valores são superiores.

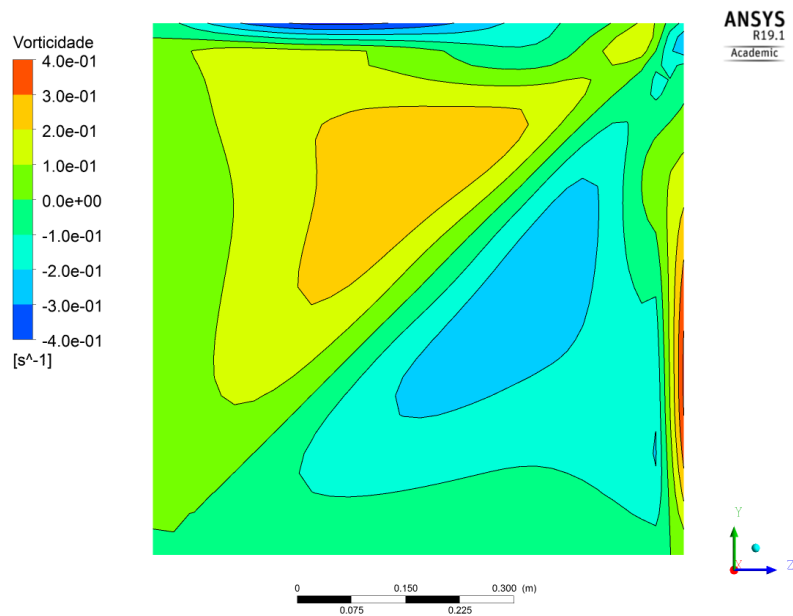


Figura 4.27: Vorticidade na secção de saída do domínio

4.6.0.3 Uniformidade do escoamento na secção a jusante do divergente

No contorno de V_x na secção de saída (figura 4.28) é possível constatar que apresenta um padrão um pouco distorcido e valores de velocidade longitudinal inferiores ao caso

do contorno de V_x presente na figura 4.11a.

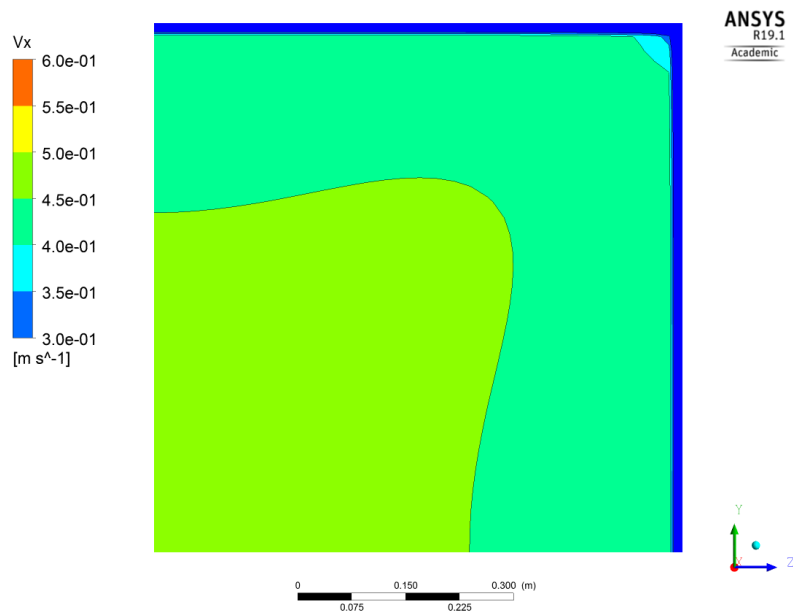


Figura 4.28: Contorno de V_x na secção de saída do domínio do caso de comparação.

Tendo em conta os resultados para o parâmetro α , vorticidade e uniformidade de V_x na saída conclui-se que era necessário um aumento do troço a jusante como se fez para o caso de estudo.

CONCLUSÃO

5.1 Conclusões

Relativamente às conclusões deste estudo, é importar chamar à atenção, novamente, para o facto de que nesta dissertação não foi simulado o túnel aerodinâmico completo. Para estar completo faltava simular o convergente que é um componente de extrema importância, nomeadamente no que respeita à aceleração da dissipação de turbilhões a jusante do divergente.

Passando agora às conclusões.

Apesar de se ter realizado simulações para os modelos $k-\epsilon$ *Standard*, $k-\epsilon$ *Realizable* e *Reynolds Stress Model*, as diferenças encontradas entre modelos, para os contornos de V_x ao longo de secções transversais ao domínio, não justificaram a apresentação de resultados para os três modelos. Optou-se, com base na literatura presente no Capítulo 2, pelo modelo RSM.

A simulação do domínio sem rede mostrou a existência de uma bolha de recirculação de grandes dimensões, que ocupa metade da secção em algumas zonas. Observou-se que a pressão estática apresentava valores negativos. Esperava-se que pelo menos no troço a jusante a pressão recuperasse para valores positivos. As análises das linhas de corrente, da vorticidade, do parâmetro α e da uniformidade do escoamento na secção de saída mostraram que o escoamento após o fecho da bolha ainda não tinha tido espaço para se poder desenvolver completamente e por conseguinte a pressão não recuperava. Desta forma, procedeu-se ao aumento do troço a jusante para o dobro. Os resultados mostraram que para além da pressão já recuperar para valores ligeiramente acima de zero, o aumento do domínio, que por sua vez permite o desenvolvimento completo do escoamento, tem influência na dimensão da bolha de recirculação.

A introdução das redes provou ter um efeito dissipador da zona de recirculação. Observando as linhas de corrente, que mostraram que as redes tornavam o escoamento bastante torcido e tendo em conta os resultados positivos observados para o aumento do domínio, realizado anteriormente, procedeu-se de novo ao aumento do troço a jusante, desta vez para o triplo. Como o escoamento se encontrava bastante torcido, os efeitos do aumento do domínio foram ainda mais notórios. Não só a redução da dimensão da bolha foi maior, como também as linhas de corrente mostraram um escoamento menos torcido. O aumento do domínio também teve influência nos valores de pressão que aumentaram. Apesar da bolha diminuir relativamente ao caso do domínio mais pequeno, mesmo a rede com $K=3$ não foi capaz de dissipar a bolha por completo. Outro resultado a salientar é que o efeito dissipador das redes é maior a jusante destas. Relativamente aos efeitos que as redes têm no escoamento, as redes com $K=0.8$ e $K=1.5$ tornam o escoamento mais torcido relativamente ao caso sem rede, enquanto que a rede com $K=3$ torna o escoamento menos torcido. Provou-se que a rede com maior coeficiente de queda de pressão apresenta valores menores do parâmetro α , significando menor magnitude das velocidades laterais, ou seja, um escoamento menos torcido tanto no troço a jusante como no divergente.

Apesar do efeito dissipador das redes, nesta dissertação não foi possível analisar o seu verdadeiro propósito. A utilização das redes tem como finalidade de impor uma queda de pressão de modo a reduzir a espessura da camada limite no divergente, impedindo a separação da camada limite. Uma vez que não se conseguiu dissipar por completo a bolha de recirculação esta análise testar o verdadeiro propósito das redes.

O caso de comparação com o divergente de secção quadrada permitiu concluir que o facto de haver uma mudança de variação do tipo de secção transversal no divergente de secção retangular causa uma maior perturbação no escoamento. A zona de recirculação verificada para o caso de secção quadrada diminui tanto dentro do divergente como no troço a jusante. O parâmetro α também diminui bastante, o que significa o menor intensidade das velocidades laterais, resultando num escoamento menos torcido. Verifica-se uma maior uniformidade do escoamento na secção de saída do domínio para o caso de secção quadrada.

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Uma vez que nesta dissertação não se conseguiu testar o verdadeiro propósito das redes devido à presença da bolha, a primeira sugestão é conseguir eliminar a bolha por completo. Uma vez que $K=3$ já é considerado um coeficiente elevado e que também não se quer introduzir uma perda de carga demasiado elevada, poderá ser necessário recorrer a outros métodos a fim de eliminar a bolha.

Simulado o túnel aerodinâmico completo, a primeira sugestão é simular o túnel com o convergente, a fim de perceber se, assim, o escoamento a jusante da rede melhora relativamente aos vórtices, tornando o escoamento menos torcido, já que o convergente acelera o processo de dissipação dos vórtices.

Tendo a bolha de recirculação eliminada, a segunda sugestão seria testar de novo as redes, com o convergente, e verificar se impedem a separação da camada limite no divergente.

Tendo o túnel aerodinâmico completo simulado, a zona de recirculação eliminada e a queda de pressão imposta pela rede seja a adequada, passar para a parte experimental, começando por simular o tubo cilíndrico presente no LMFTA que servirá para a obtenção de resultados experimentais. Testar redes de várias opacidades, na instalação existente no LMFTA, a fim de medir as perdas de carga. Combinar os resultados experimentais com os numéricos de modo a obter a opacidade adequada para o túnel a ser instalado no LMFTA.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ANSYS,I. (2013). *Ansys fluent theory guide*. ANSYS, Inc.
- [2] Ally, A. M., Trupp, A. C., Gerrard, A. D. 1978. Measurement and prediction of fully developed turbulent flow in an equilateral triangular duct. *J. Fluid Mech.* 85: 57.
- [3] Baines, W.D. e Peterson, E.G. 1951. An Investigation of flow through screens. *Trans. ASME* 73: 467-80.
- [4] Bell, J. H. e Mehta, R. D. 1988. Contraction design for small low-speed contractions. *AIAA* 27: 372-374.
- [5] Bradshaw, P. 1963. The effect of wind tunnel screens on "two dimensional" boundary layers. *Natl. Phys. Lab. Aerodyn. Rep.* 1085.
- [6] Bradshaw, P. 1964. Wind Tunnel screens: flow instability and its effect on aerofoil boundary layer. *J.R. Aeronaut. Soc.* 68: 198.
- [7] Brundrett, E. e Baines, W.D. (1964) The production and diffusion of vorticity in duct flow. *J. Fluid Mechanics*, vol. 19, 375-394.
- [8] Brusca, S., Lanzafame, R. e Messina, M. (2011) Low-Speed Wind Tunnel: Design and Build. Ed: Pereira, J.D. (ed) *Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments*. Nova York: Nova Science Publishers, Inc, 189-220.
- [9] Cattafesta, L., Bahr, C. e Mathew, J. (2010) Fundamentals of Wind-Tunnel Design. Ed: Blockley, R. e Shyy, W. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*.
- [10] Dryden, H.L. e Schubauer, G.G. (1947). The use of damping screens for the reduction of wind tunnel turbulence. *J. Aero. Sci.* 14, 221-228.
- [11] Elder, J.W. 1959. Steady flow through nonuniform gauzes of arbitrary shape. *J. Fluid Mech.* 5: 355-63.
- [12] Fluent. (2006). 6.3 UDF Manual. *Lebanon, New Hampshire, USA Fluent Inc.*
- [13] Groth, J. e Johansson, A.V. (1988) Turbulence reduction by screens. *J. Fluid Mechanics*, vol. 197, 139-155.

-
- [14] Hoagland, L. C. (1960). Fully developed turbulent flow in straight rectangular ducts...secondary flow, its cause and effect on the primary flow. PhD. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- [15] Hurst, K.S. e Rapley, C.W. (1991) Turbulent flow measurements in a 30/60 degree right triangular duct. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 34, 739-748.
- [16] Jr,J.D.A. (2001). *Fundamentals of Aerodynamics*, 3rd ed. McGraw-Hill.
- [17] Kornilov,V.I. (2017) Three-dimensional turbulent near-wall flows in streamwise corners: current state and questions. *J.Progress in Aerospace Sciences*, vol.94, 46-81.
- [18] Lau, Y.L. e Baines, W.D. 1968. Flow of stratified fluid through curved screens. *J. Fluid Mech.*33: 721-38.
- [19] Laws,E.M. e Livesey,J.L.(1978) Flow through screens, *Ann. Rev. Fluid Mech.*,247-266.
- [20] Mateus, R.L.P. (2018) *Estudo Numérico da Interação entre Turbinas Eólicas Modeladas por Discos Atuantes*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [21] Mathew,J., Bahr,C., Carroll,B., Sheplak,M. e Cattafesta,L. Design, Fabrication, and Characterization of an Anechoic Wind Tunnel Facility. *Em:11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Monterey, California,23 - 25 Maio 2005. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [22] Mehta,R.D. (1979) The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers. *J. Progress in Aerospace Sciences*, vol. 18, 59-120.
- [23] Mehta, R. D. and Bradshaw, P. (1979) Design rules for small low speed wind tunnels. *The Aeronautical Journal*, vol. 63, 443-453.
- [24] Morgan, P.G. 1960. The stability of flow through porous screens. *J.R. Aeronaut. Soc.*64: 359-62.
- [25] Nikuradse, J. (1926). Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen. Thesis, Göttingen, 1926. *V.D.I.Forsch*, 281.
- [26] Owen,P.R. e Zienkiewicz, H.K. (1957) The production of uniform shear flow in a wind tunnel. *J. Fluid Mechanics*, vol.2, 521-531.
- [27] Pereira, G.M.D.E. (2016) *Estudo CFD do Convergente de um Túnel Aerodinâmico*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [28] Prandtl, L. (1927). Über den Reibungswiderstand strömenderluft. *Ergeb. Aerodyn. Versuch.*, Göttingen, III series.

- [29] Prandtl, L. (1932). On turbulent secondary flows in pipes noncircular cross-section. Handbuch der Experimentalphysik, Leipzig, Germany, vol.4, part2, p.73. *NACA Tech. Mem.*726.
- [30] Speziale, C. G. (1982). Herstellung einwandfreier Lufströme (windkanäle). *Int. J. Engng. Sci.* Vol. 20 863-872.
- [31] Versteeg,H. e Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics-the finite volume method (second)*.PEARSON - Prentice Hall.
- [32] White,F. (2011). *Fluid Mechanics, 7th ed.*McGraw-Hill.



USER DEFINED FUNCTIONS

A.1 Queda de Pressão

A UDF que modela a queda de pressão possui a seguinte estrutura:

- Diretrizes de inclusão;
- Características da rede - coeficiente de queda de pressão;
- Posição da rede na direção x ;
- Inicialização da macro *DEFINE SOURCE*:
 - Inicialização das variáveis de uma matriz, a fim de guardar as coordenadas do centróide de cada volume finito, e de variáveis que assumem valores reais;
 - Cálculo do centróide de cada volume finito;
 - Verificação da posição da rede;
 - Definição do termo *source*- cálculo da massa volúmica e da velocidade, através dos comandos $C_R(c,t)$ e $C_U(c,t)$;
 - Definição do termo dS/du
- Fim da macro

```
#include "udf.h"
#include "stdio.h"
#include "math.h"

// Caracteristicas da rede
#define Cp 0.8

// Posicionamento da rede
#define pos_x_1 0.895
#define pos_x_2 0.902774

DEFINE_SOURCE( Queda_Pressao,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source, con, con2;
    C_CENTROID(x,c,t);

    //Verificacao da posicao da rede
    if (x[0]>(pos_x_1) && x[0]<(pos_x_2))

        con=Cp*0.5*C_R(c,t);
        source=-con*fabs(C_U(c,t))*C_U(c,t);
        dS[eqn]=-2.*con*fabs(C_U(c,t));
        return source;
}
```

Figura A.1: UDF da queda de pressão da rede com $K=0,8$.


```
#include "udf.h"
#include "stdio.h"
#include "math.h"

// Caracteristicas da rede
#define Cp 1.5

// Posicionamento da rede
#define pos_x_1 0.895
#define pos_x_2 0.902774

DEFINE_SOURCE( Queda_Pressao,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source, con, con2;
    C_CENTROID(x,c,t);

    //Verificacao da posicao da rede
    if (x[0]>(pos_x_1) && x[0]<(pos_x_2))

        con=Cp*0.5*C_R(c,t);
        source=-con*fabs(C_U(c,t))*C_U(c,t);
        dS[eqn]=-2.*con*fabs(C_U(c,t));
        return source;
}
```

Figura A.2: UDF da queda de pressão da rede com $K=1,5$.

```
#include "udf.h"
#include "stdio.h"
#include "math.h"

// Características da rede
#define Cp 3.0

// Posicionamento da rede
#define pos_x_1 0.895
#define pos_x_2 0.902774

DEFINE_SOURCE( Queda_Pressao,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source, con, con2;
    C_CENTROID(x,c,t);

    //Verificacao da posicao da rede
    if (x[0]>(pos_x_1) && x[0]<(pos_x_2))

        con=Cp*0.5*C_R(c,t);
        source=-con*fabs(C_U(c,t))*C_U(c,t);
        dS[eqn]=-2.*con*fabs(C_U(c,t));
        return source;
}
```

Figura A.3: UDF da queda de pressão da rede com $K=3,0$.

A.2 Fatores Multiplicativos impostos à energia cinética turbulenta e à taxa de dissipação turbulenta

As UDF que modela os fatores multiplicativos possuem a seguinte estrutura:

- Diretrizes de inclusão;
- Posição da rede na direção x ;
- Inicialização da macro *DEFINE SOURCE*:
 - Inicialização das variáveis de uma matriz, a fim de guardar as coordenadas do centróide de cada volume finito, e de variáveis que assumem valores reais;
 - Cálculo do centróide de cada volume finito;
 - Verificação da posição da rede;

A.2. FATORES MULTIPLICATIVOS IMPOSTOS À ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA E À TAXA DE DISSIPACÃO TURBULENTA

- Definição do termo *source*-impõe um fator multiplicativo à energia cinética turbulenta, $C_K(c,t)$, e à taxa de dissipação turbulenta, $C_D(c,t)$;
 - Definição dos termos dS/dk e $dS/d\epsilon$
- Fim da macro

```
#include "udf.h"
#include "stdio.h"
#include "math.h"

// Posicionamento da rede
#define pos_x_1 0.895
#define pos_x_2 0.902774

DEFINE_SOURCE( energia_turbulenta,c,t,dS,eqn)
{

    real x[ND_ND];
    real source;
    C_CENTROID(x,c,t);

    //Verificacao da posicao da rede
    if (x[0]>(pos_x_1) && x[0]<(pos_x_2))

        source=1.2*C_K(c,t);
        dS[eqn]=1.2;
        return source;
}

DEFINE_SOURCE( diss_energia_turbulenta,c,t,dS,eqn)
{

    real x[ND_ND];
    real source;
    C_CENTROID(x,c,t);

    //Verificacao da posicao da rede
    if (x[0]>(pos_x_1) && x[0]<(pos_x_2))

        source=1.3145*C_D(c,t);
        dS[eqn]=1.3145;
        return source;
}
```

Figura A.4: UDF dos fatores multiplicativos impostos à energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta.



RESULTADOS PARA OS CASOS COM REDE PARA OS MODELOS $k - \epsilon$

Neste Capítulo apresenta-se a evolução de V_x ao longo do domínio para os casos com rede, para os modelos $k - \epsilon$ *Standard* e $k - \epsilon$ *Realizable*. Como mencionado no Capítulo 4 e se constata neste Capítulo, as diferenças encontradas entre modelos são pouco relevantes. Assim sendo não se justificou a apresentação de resultados para estes modelos, para as restantes variáveis.

B.1 Evolução de V_x para o modelo $k - \epsilon$ *Standard*

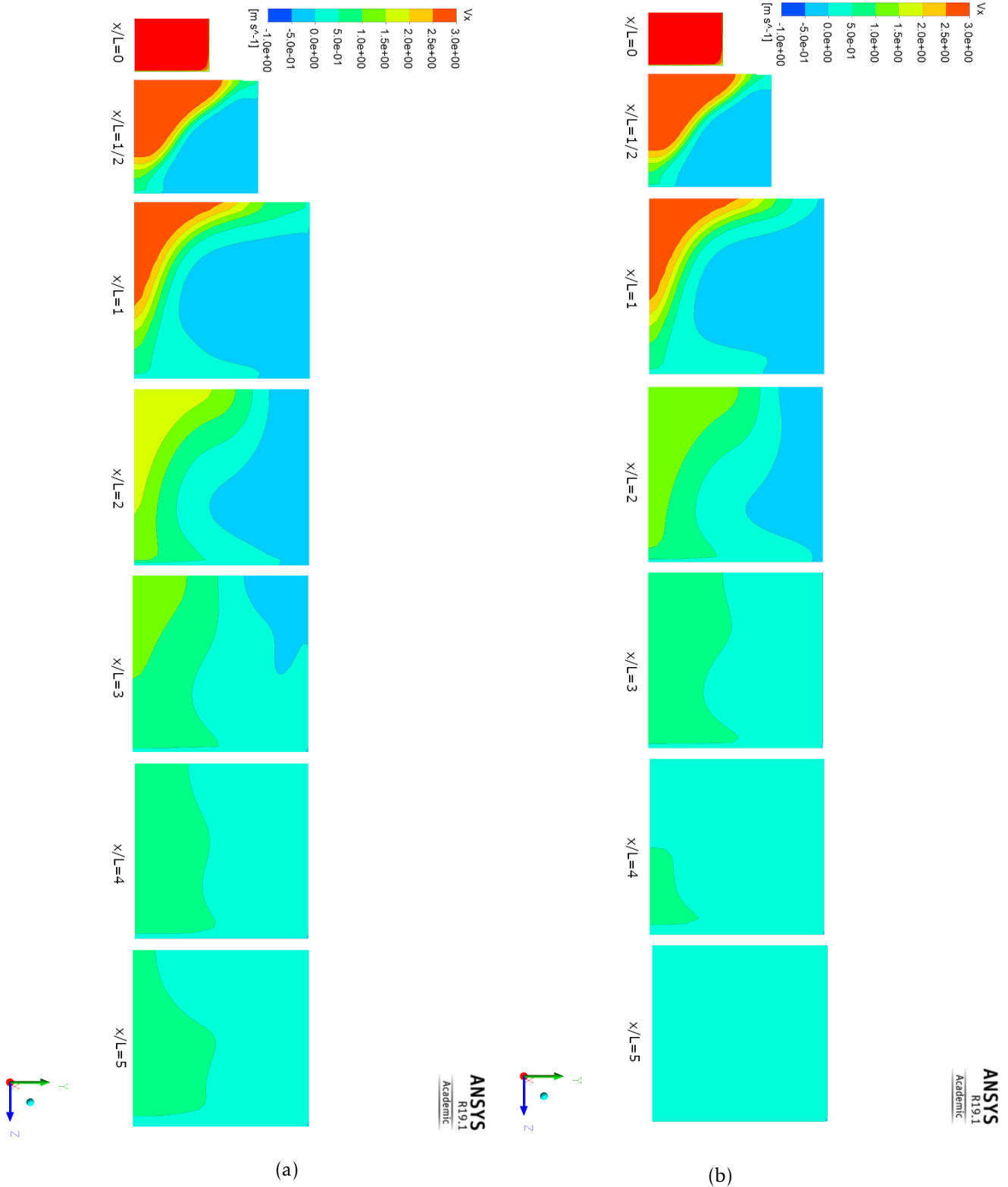
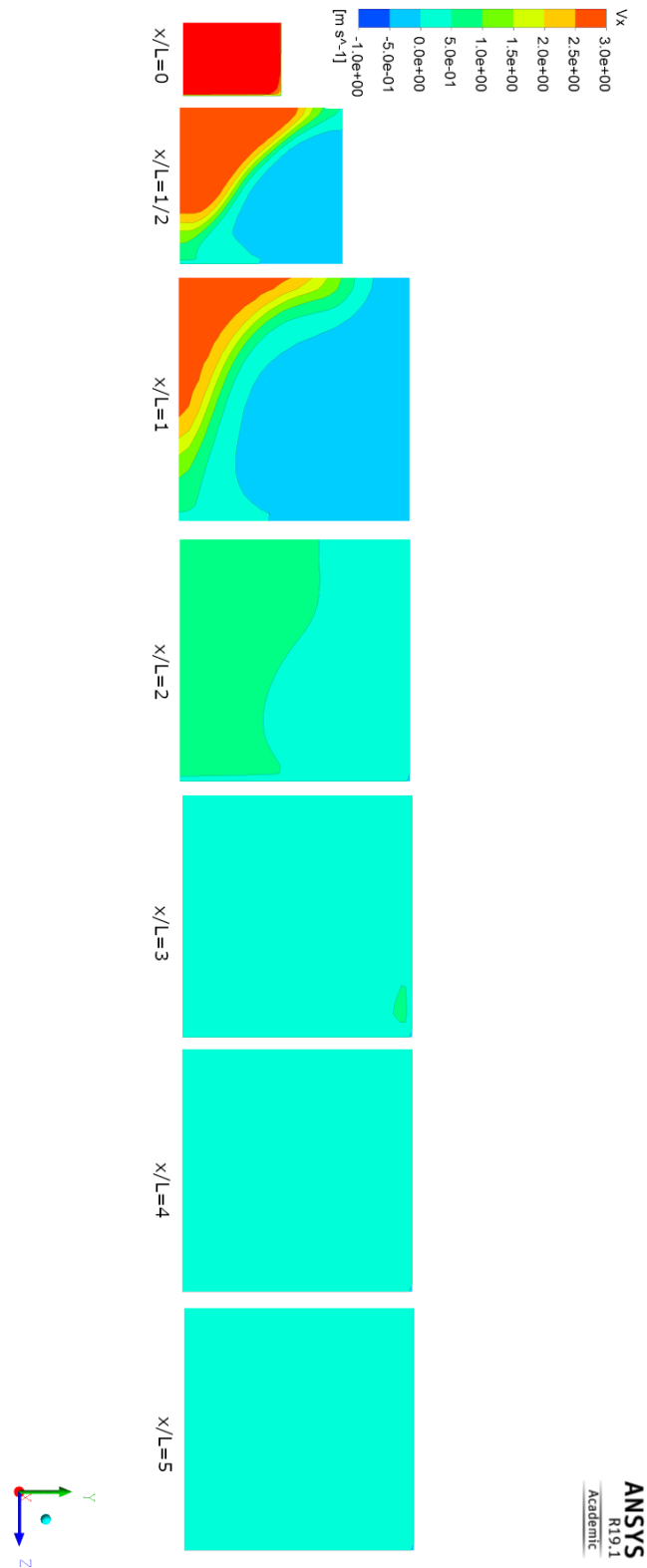


Figura B.1: Evolução da velocidade longitudinal para o modelo $k - \epsilon$ *Standard* onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continua).



(c)

Figura B.1: Evolução da velocidade longitudinal para o modelo $k-\epsilon$ Standard onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K=3.0$ (continuação).

B.2 Evolução de V_x para o modelo $k - \epsilon$ *Realizable*

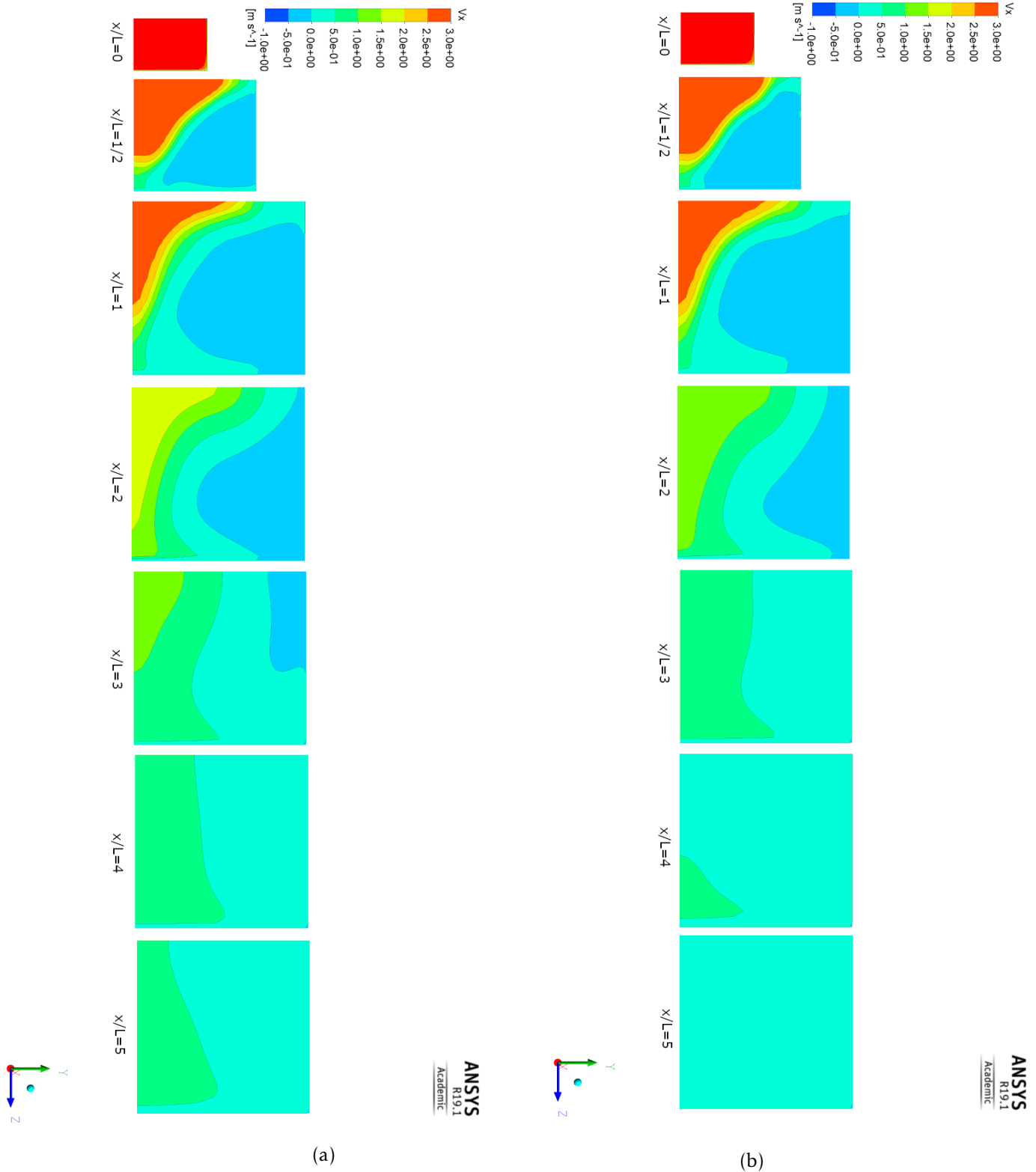
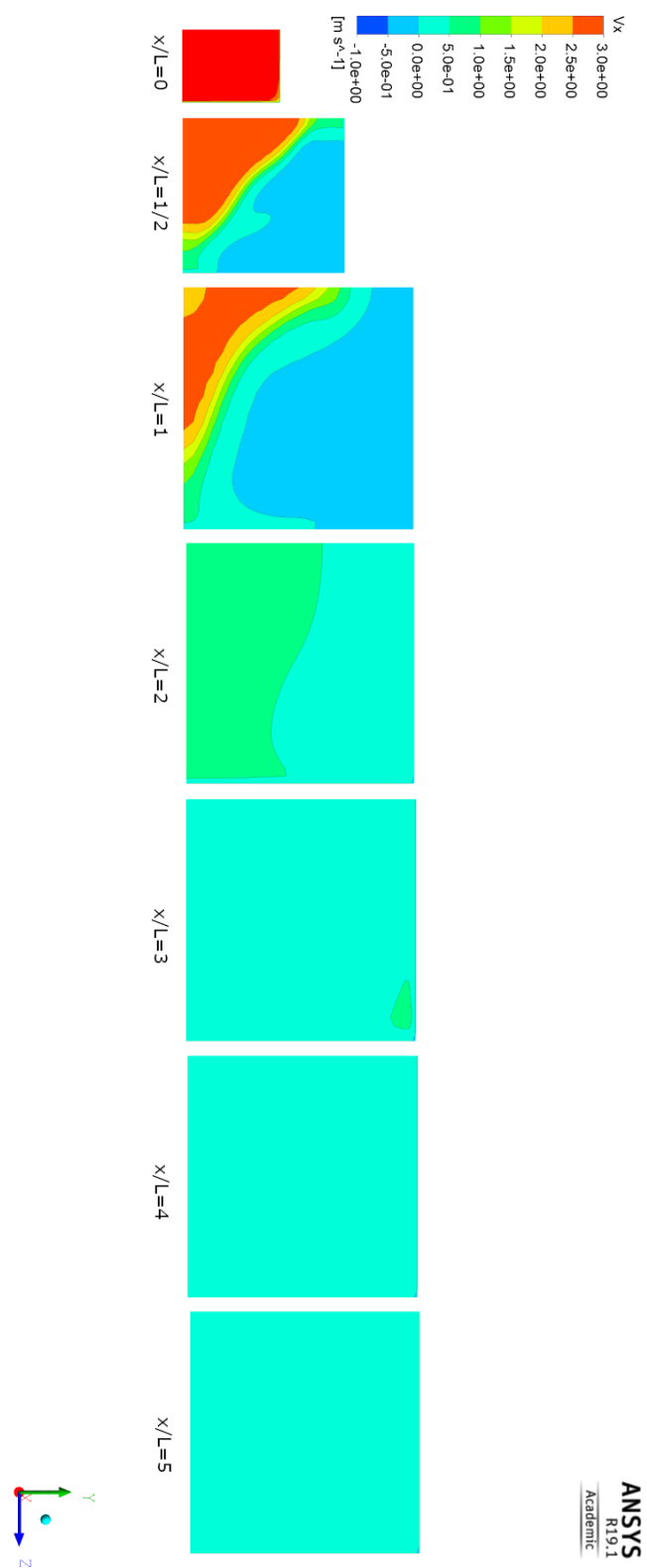


Figura B.2: Evolução da velocidade longitudinal para o modelo $k - \epsilon$ *Realizable* onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continua).



(c)

Figura B.2: Evolução da velocidade longitudinal para o modelo $k-\epsilon$ *Realizable* onde foram simuladas as redes com (a) $K=0.8$, (b) $K=1.5$ e (c) $K= 3.0$ (continuação).